Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com

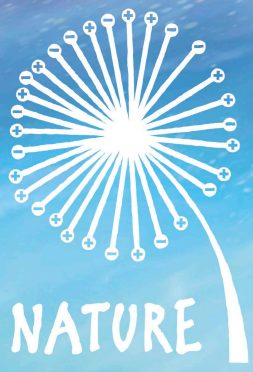
DK

IN SEARCH OF ATOMIC GLUE

THERE IS GEOMETRY IN THE HUMMING OF THE STRINGS

THE HUNT FOR THE QUARK

DOES OXFORD STOP AT THIS TRAIN?



NATURE IS ABSURD

MOTION WILL PERSIST

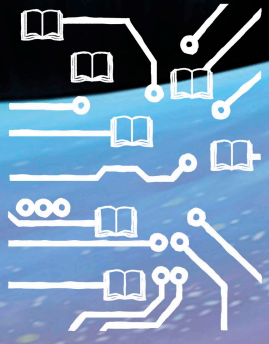
THE PHYSICS BOOK

BIG IDEAS SIMPLY EXPLAINED

A NEW IDEA OF REALITY

THE CAT IS BOTH ALIVE AND DEAD

AN ENCYCLOPEDIA ON THE HEAD OF A PIN



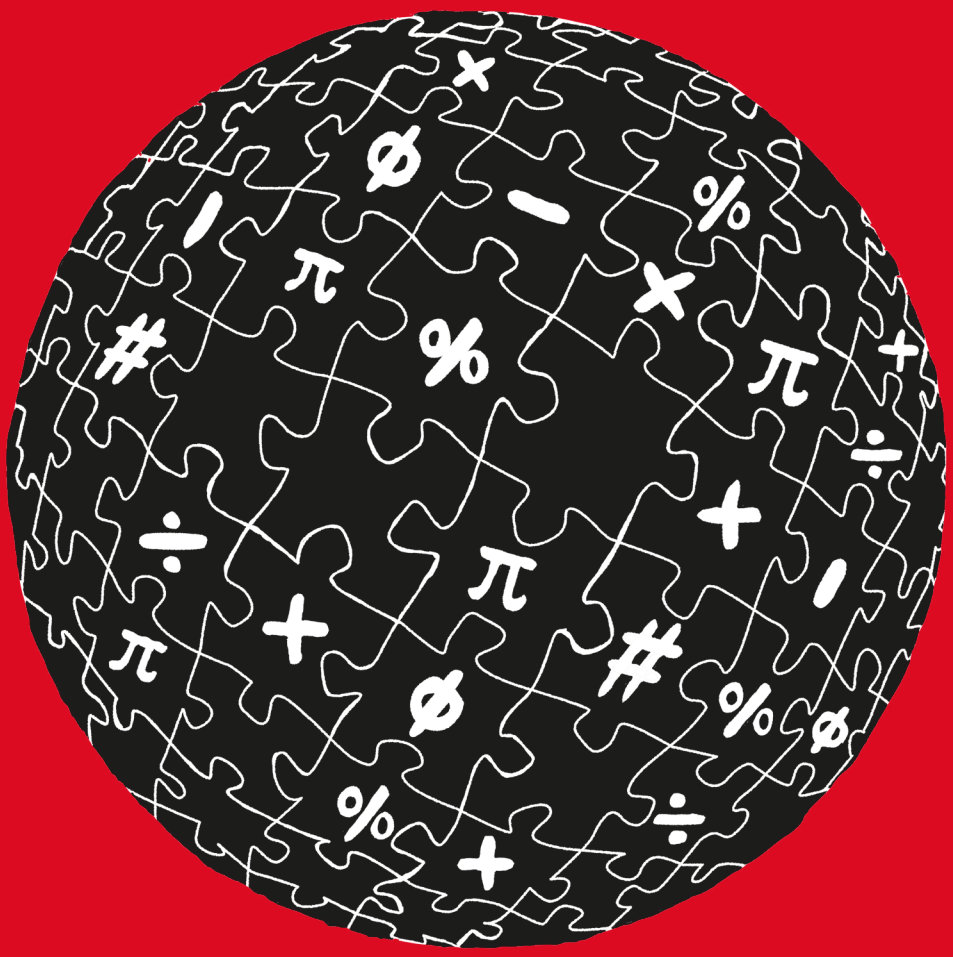
WONDROUS FORCES

VISIBLE MATTER ALONE IS NOT ENOUGH

THE DOMINION OF MAGNETIC FORCES

FOREWORD BY

JIM AL-KHALILI



GRANDEIDEAS

EL LIBRO DE ARTE

EL LIBRO DE ASTRONOMÍA

EL LIBRO DE LA BIBLIA

EL LIBRO DE NEGOCIOS

EL LIBRO DE MÚSICA CLÁSICA EL LIBRO DEL CRIMEN

EL LIBRO DE ECOLOGÍA

EL LIBRO DE ECONOMÍA

EL LIBRO DEL FEMINISMO

EL LIBRO DE HISTORIA

EL LIBRO DE LITERATURA

EL LIBRO DE MATEMÁTICAS

EL LIBRO DE PELÍCULA

EL LIBRO DE MITOLOGÍA

EL LIBRO DE FILOSOFÍA

EL LIBRO DE POLÍTICA

EL LIBRO DE PSICOLOGÍA

EL LIBRO DE LAS RELIGIONES

EL LIBRO DE CIENCIA

EL LIBRO DE SHAKESPEARE

EL LIBRO DE SHERLOCK HOLMES EL LIBRO DE SOCIOLOGÍA

SIMPLEMENTEEXPLICADO

EL PHYSICS LIBRO

DK

EL PHYSICS LIBRO

DK

DK LONDRES

EDITOR DE ARTE SUPERIOR
Gillian Andrews

EDITORES PRINCIPALES
Camilla Hallinan, Laura Sandford

EDITORES
John Andrews, Jessica Cawthra, Joy Evatt, Claire Gell, Richard Gilbert, Tim Harris, Janet Mohun, Victoria Pyke, Dorothy Stannard, Raquel Warren Chadd

EDITOR DE EE. UU.
Megan Douglass

ILUSTRACIONES
Jaime Graham

DISEÑO DE LA CHAQUETA
GERENTE DE DESARROLLO
Sofía MTT

PRODUCTOR, PREPRODUCCIÓN
Gillian Reid

PRODUCTOR
Nancy Jane Maun

EDITOR SUPERIOR DE ARTE
Lee Griffiths

JEFE DE REDACCIÓN
Gareth Jones

DIRECTOR ASOCIADO DE PUBLICACIONES
Liz Wheeler

DIRECTOR DE ARTE
karen yo

DIRECTOR DE DISEÑO
Philip Ormerod

DIRECTORA EDITORIAL
Jonathan Metcalf

DK DELHI

EDITOR DE ARTE DEL PROYECTO
Pooja pipil

EDITORES DE ARTE
Meenal Goel, Debjyoti Mukherjee

EDITOR DE ARTE ASISTENTE
Nobina Chakravorty

EDITOR EN JEFE
Suefa Lee

EDITOR ASISTENTE
Aashirwad Jain

DISEÑADOR DE CHAQUETAS SENIOR
Suhita Dharamjit

DISEÑADOR PRINCIPAL DE DTP
Neeraj Bhatia

DISEÑADOR DTP
Anita Yadav

INVESTIGADOR DE IMAGEN DEL PROYECTO
Deepak Negi

RESPONSABLE DE INVESTIGACIÓN DE IMAGEN
Taiyaba Khatoon

RESPONSABLE DE PREPRODUCCIÓN
Balwant Singh

JEFE DE PRODUCCIÓN
Pankaj Sharma

GESTIONAR EL EDITOR DE ARTE
Sudakshina Basu

EDITOR DIRECTIVO SUPERIOR
Rohan Sinha

estilo original por
ESTUDIO 8

Primera edición americana, 2020
Publicado en los Estados Unidos por DK Publishing
1450 Broadway, Suite 801, Nueva York, NY 10018

Copyright © 2020 Dorling Kindersley Limited DK, una división de Penguin Random House LLC

20 21 22 23 24 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
001–316670–marzo/2020

Reservados todos los derechos.
Sin limitar los derechos bajo los derechos de autor reservados anteriormente, ninguna parte de esta publicación puede reproducirse, almacenarse o introducirse en un sistema de recuperación, ni transmitirse, de ninguna forma ni por ningún medio. (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación o de otro tipo), sin el permiso previo por escrito del propietario de los derechos de autor.

Publicado en Gran Bretaña por
Dorling Kindersley Limited

Un registro de catálogo de este libro está disponible en la Biblioteca del Congreso.

ISBN: 978–1–4654–9102–2

Los libros de DK están disponibles con descuentos especiales cuando se compran al por mayor para promociones de ventas, primas, recaudación de fondos o uso educativo. Para obtener más información, comuníquese con: DK Publishing Special Markets, 1450 Broadway, Suite 801, Nueva York, Nueva York 10018

VentasEspeciales@dk.com

Impreso en China

UN MUNDO DE IDEAS: VER TODO LO QUE HAY QUE SABER

www.dk.com

COLABORADORES

DR. BEN STILL, EDITOR CONSULTOR

Ben, comunicador científico, físico de partículas y autor galardonado, enseña física en la escuela secundaria y también es investigador visitante en la Universidad Queen Mary de Londres. Después de una maestría en ciencia espacial, un doctorado en física de partículas y años de investigación, ingresó al mundo de la divulgación y la educación en 2014. Es autor de una colección cada vez mayor de libros de divulgación científica y viaja por el mundo enseñando física de partículas. utilizando LEGO®.

JUAN FARNDON

John Farndon ha sido preseleccionado cinco veces para el Premio al Libro Científico para Jóvenes de la Royal Society, entre otros premios. Autor de libros populares sobre ciencia y naturaleza con numerosas publicaciones, ha escrito alrededor de 1.000 libros sobre una variedad de temas, incluidos títulos aclamados internacionalmente como *El Atlas de los Océanos*, *¿Crees que eres inteligente?*, y *No abrir* y ha contribuido a importantes libros como *Ciencia* y *Ciencia año tras año*.

TIEMPO HARRIS

Tim Harris, autor de numerosas publicaciones sobre ciencia y naturaleza tanto para niños como para adultos, ha escrito más de 100 libros de referencia, en su mayoría educativos, y ha contribuido a muchos otros. Éstas incluyen *Una historia ilustrada de la ingeniería*, *¡La física importa!*, *Grandes científicos*, *Explorando el Sistema Solar*, y *Rutas de la ciencia*.

HILARY CORDERO

Hilary Lamb estudió física en la Universidad de Bristol y comunicación científica en el Imperial College de Londres. Ella es periodista de plantilla en *Revista Ingeniería y Tecnología*, que cubre ciencia y tecnología, y ha escrito para títulos anteriores de DK, incluido *Cómo funciona la tecnología* y *Explicatorio de la Ciencia*.

JONATHAN O'CALLAGHAN

Con experiencia en astrofísica, Jonathan O'Callaghan ha sido periodista espacial y científico durante casi una década. Su trabajo ha aparecido en numerosas publicaciones, incluidas *Científico nuevo*, *cableado*, *Científico americano*, y *Forbes*. También ha aparecido como experto espacial en varios programas de radio y televisión, y actualmente trabaja en una serie de libros educativos de ciencias para niños.

PATEL MUKUL

Mukul Patel estudió ciencias naturales en el King's College de Cambridge y matemáticas en el Imperial College de Londres. El es el autor de *Tenemos tu número*, un libro de matemáticas para niños, y durante los últimos 25 años ha contribuido a muchos otros libros en campos científicos y tecnológicos para una audiencia general. Actualmente está investigando cuestiones éticas en la IA.

ROBERT SNEDDEN

Robert Snedden ha estado involucrado en la publicación durante 40 años, investigando y escribiendo libros de ciencia y tecnología para jóvenes sobre temas que van desde la ética médica hasta la exploración espacial, la ingeniería, las computadoras e Internet. También ha contribuido a historias de matemáticas, ingeniería, biología y evolución, y ha escrito libros para un público adulto sobre avances en matemáticas y medicina y las obras de Albert Einstein.

GILES GORRIÓN

Giles Sparrow, autor de divulgación científica especializado en física y astronomía, estudió astronomía en el University College London y comunicación científica en el Imperial College London. Es autor de libros que incluyen *Física en minutos*, *Física al cuadrado*, *La prueba del genio* y *¿Qué forma tiene el espacio?*, así como DK *Vuelo espacial* y ha contribuido a los títulos más vendidos de DK, incluidos *Universo* y *Ciencia*.

JIM AL-KHALILI, PRÓLOGO

Académico, autor y locutor, Jim Al-Khalili FRS tiene una cátedra dual en física teórica y participación pública en la ciencia en la Universidad de Surrey. Ha escrito 12 libros de divulgación científica, traducidos a más de 20 idiomas. Presentador habitual de la televisión británica, también es presentador del programa Radio 4. *La vida científica*. Recibió la Medalla Michael Faraday de la Royal Society, la Medalla Kelvin del Instituto de Física y la Medalla Stephen Hawking por la comunicación científica.

CONTENIDO

10 INTRODUCCIÓN

MEDICIÓN
Y MOVIMIENTO
LA FÍSICA Y LA
MUNDO COTIDIANO

18 **El hombre es la medida de todas las cosas**
Distancia de medición

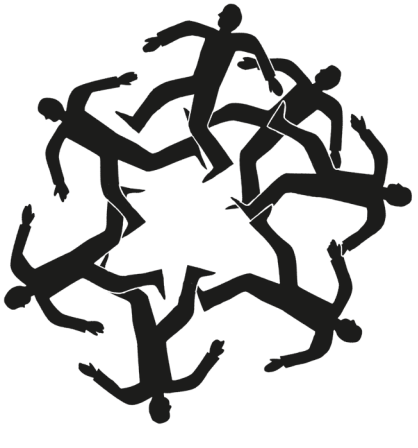
20 **Una pregunta prudente es la mitad de la sabiduría**
El método científico

24 **todo es numero**
El lenguaje de la física.

32 **Los cuerpos no sufren más resistencia que la del aire.**
Caída libre

36 **Una nueva máquina para multiplicar fuerzas**
Presión

37 **El movimiento persistirá**
Impulso



38 **El mas maravilloso producciones de la artes mecanicas**
Midiendo el tiempo

40 **Toda acción tiene una reacción.**
Leyes del movimiento

46 **El marco del sistema del mundo.**
Leyes de la gravedad

52 **La oscilación está en todas partes**
Movimiento armónico

54 **No hay destrucción de la fuerza.**
energía cinética y energía potencial

55 **La energía no se puede crear ni destruir.**
la conservación de energía

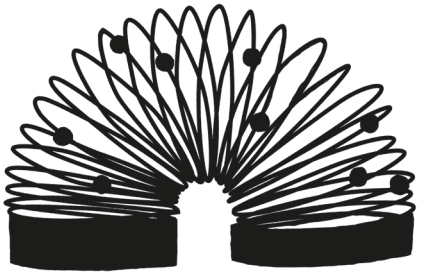
56 **Un nuevo tratado de mecánica.**
Energía y movimiento

58 **Debemos mirar a los cielos para la medida de la Tierra.**
Unidades SI y constantes físicas

ENERGÍA Y MATERIA
MATERIALES Y CALOR

68 **Los primeros principios de el universo**
Modelos de materia

72 **Como es la extensión, así es la fuerza.**
Estirar y apretar



76 **Las diminutas partes de la materia están en rápido movimiento.**
fluidos

80 **Buscando el secreto del fuego** Calor y transferencias

82 **Poder elástico en el aire.** las leyes de los gases

86 **La energía del universo es constante.**
Energía interna y la primera ley de la termodinámica.

90 **El calor puede ser una causa de movimiento.**
Motores térmicos

94 **La entropía del universo tiende a un máximo.**
La entropía y la segunda ley de la termodinámica.

100 **El fluido y su vapor se vuelven uno.**
Cambios de estado y constitución de bonos

104 **Bolas de billar que chocan en una caja**
El desarrollo de la mecánica estadística.

112 **Buscando algo de oro del sol**
Radiación termal

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

DOS FUERZAS SE UNEN

122 **Fuerzas maravillosas**
Magnetismo

124 **la atracción de electricidad**
Carga eléctrica

128 **La energía potencial se convierte en movimiento palpable.**
Potencial eléctrico

130 **Un impuesto a la energía eléctrica**
corriente eléctrica y resistencia

134 **Cada metal tiene un poder determinado.**
hacer imanes

136 **Electricidad en movimiento**
El efecto motor

138 **El dominio de las fuerzas magnéticas.**
La inducción y el efecto generador.

142 **La luz en sí es una perturbación electromagnética.** Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell.

148 **El hombre aprisionará el poder del sol**
Generar electricidad

152 **Un pequeño paso en el control de la naturaleza**
Electrónica

156 **Electricidad animal**
Bioelectricidad

157 **Un totalmente inesperado descubrimiento científico**
Almacenamiento de datos

158 **Una enciclopedia sobre la cabeza de un alfiler.**
Nanoelectrónica

159 **Un solo polo, ya sea norte o sur**
Monopolos magnéticos

SONIDO Y LUZ

LAS PROPIEDADES DE LAS ONDAS

164 **Hay geometría en el zumbido de las cuerdas.**
Música

168 **La luz sigue el camino del menor tiempo.**
Reflexión y refracción

170 **Un nuevo mundo visible**
Luz de enfoque

176 **La luz es una onda.**
Luz grumosa y ondulada

180 **Nunca se sabe que la luz se doblegue hacia la sombra.**
Difracción e interferencia

184 **Los lados norte y sur del rayo.**
Polarización

188 **Los trompetistas y el tren de las olas.**
El efecto Doppler y el corrimiento al rojo

192 **Estas misteriosas olas no podemos ver**
Ondas electromagnéticas

196 **El lenguaje de los espectros es una verdadera música de las esferas.** Luz del átomo

200**Ver con sonido**
Piezoelectricidad y ultrasonido.

202**Un gran eco fluctuante**
Ver más allá de la luz

EL MUNDO CUÁNTICO

NUESTRO UNIVERSO INCIERTO

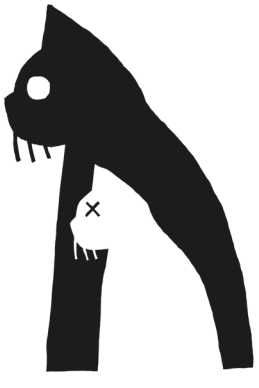
208**La energía de la luz es distribuido discontinuamente en el espacio**
Cuantos de energía

212 **No se comportan como nada que hayas visto jamás.**
Partículas y ondas

216 **Una nueva idea de la realidad.** Números cuánticos

218 **todo son olas**
Matrices y ondas

220**El gato está vivo. y muerto**
El principio de incertidumbre de Heisenberg



222**Acción espeluznante a distancia**
Entrelazamiento cuántico

224**La joya de la física**
Teoría cuántica de campos

226**Colaboración entre universos paralelos**
Aplicaciones cuánticas

NUCLEAR Y PARTÍCULA FÍSICA

DENTRO DEL ÁTOMO

236**La materia no es infinita divisible**
Teoría atómica

238**Una verdadera transformación de importancia**
rayos nucleares

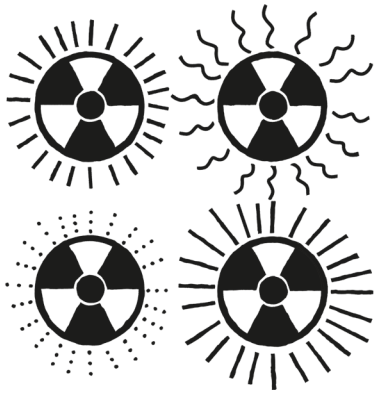
240**La constitución de la materia.**
El núcleo

242**Los ladrillos de los cuales átomos. están construidos**
Partículas subatómicas

244**Pequeños jirones de nube**
Partículas en la cámara de niebla.

246**Los opuestos pueden explotar**
Antimateria

247**En busca de pegamento atómico**
la fuerza fuerte



248**Cantidades terribles de energía**
Bombas nucleares y energía.

252**Una ventana a la creación**
Aceleradores de partículas

256**La búsqueda del quark**
El zoológico de partículas y los quarks

258**Partículas nucleares idénticas no siempre actúes igual**
Portadores de fuerza

260**La naturaleza es absurda**
Electrodinámica cuántica

261**El misterio de los desaparecidos neutrinos**
neutrinos masivos

262**creo que lo tenemos**
El bosón de Higgs

264**¿Dónde tiene todos los ¿Se ha ido la antimateria?**
Asimetría materia-antimateria

265**Las estrellas nacen y mueren**
Fusión nuclear en estrellas

LA RELATIVIDAD Y LA UNIVERSO

NUESTRO LUGAR EN EL COSMOS

270**Los devanados del cuerpos celestiales**
Los cielos

272**La tierra no es el centro. del universo**
Modelos del universo

274 **No hay tiempos reales ni longitudes reales**
De la relatividad clásica a la relatividad especial

275**El sol como estaba a punto hace ocho minutos**
La velocidad de la luz

276**¿Oxford se detiene en ¿este tren?**
Relatividad especial

280**Una unión de espacio y tiempo.**
Curvar el espacio-tiempo

281**La gravedad es equivalente a la aceleración**
El principio de equivalencia

282**¿Por qué viajar?**
¿gemelo más joven?
Paradojas de la relatividad especial

284**Evolución de las estrellas y vida**
Masa y energía

286**donde el espacio-tiempo simplemente termina**
Agujeros negros y agujeros de gusano

290**La frontera de la universo conocido**
Descubriendo otras galaxias

294**El futuro del universo**
El universo estático o en expansión.

296**El huevo cósmico, explotando en el momento de la creación**
El Big Bang

302**Materia visible sola no es suficiente**
Materia oscura

306**Un ingrediente desconocido domina el universo**
Energía oscura

308**Hilos en un tapiz**
Teoria de las cuerdas

312 **Ondas en el espacio-tiempo**
ondas gravitacionales

316 DIRECTORIO
324 GLOSARIO
328 ÍNDICE
335 COTIZACIONES
336 EXPRESIONES DE GRATITUD

PREFACIO

Me enamoré de la física cuando era niño cuando descubrí que era la materia que mejor proporcionaba respuestas a muchas de las preguntas que tenía sobre el mundo que me rodeaba: preguntas como cómo funcionan los imanes, si el espacio dura para siempre, por qué se forman los arcoíris, y cómo sabemos cómo es el interior de un átomo o el interior de una estrella. También me di cuenta de que al estudiar física podría comprender mejor algunas de las preguntas más profundas que daban vueltas en mi cabeza, como por ejemplo: ¿Cuál es la naturaleza del tiempo? ¿Cómo es caer en un agujero negro? ¿Cómo comenzó el universo y cómo podría terminar?

Ahora, décadas después, tengo respuestas a algunas de mis preguntas, pero sigo buscando respuestas a otras nuevas. La física, como ve, es una materia viva. Aunque ahora sabemos con seguridad muchas cosas sobre las leyes de la naturaleza y hemos utilizado este conocimiento para desarrollar tecnologías que han transformado nuestro mundo, todavía hay muchas más que aún no sabemos. Eso es lo que hace que la física, para mí, sea el área de conocimiento más apasionante de todas. De hecho,
A veces me pregunto por qué no todo el mundo está tan enamorado de la física como yo.

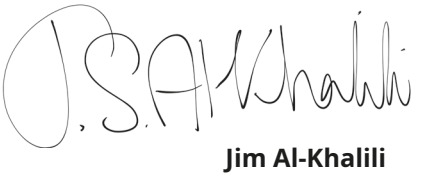
Pero para darle vida al tema, para transmitir esa sensación de asombro, se requiere mucho más que reunir una montaña de datos áridos. Explicar cómo funciona nuestro mundo consiste en contar historias; se trata de reconocer cómo hemos llegado a saber lo que sabemos sobre el universo, y se trata de compartir la alegría del descubrimiento realizado por los muchos grandes científicos que fueron los primeros en descubrir los secretos de la naturaleza. La forma en que hemos llegado a nuestra comprensión actual de la física puede ser tan importante y tan alegre como el conocimiento mismo.

Por eso siempre me ha fascinado la historia de la física. A menudo pienso que es una pena que en la escuela no se nos enseñe cómo se desarrollaron por primera vez los conceptos e ideas en la ciencia. Se espera que simplemente los aceptemos sin cuestionarlos. Pero la física, y de hecho toda la ciencia, no es así. Hacemos preguntas sobre cómo funciona el mundo y desarrollamos teorías e hipótesis. Al mismo tiempo, Hacemos observaciones y realizamos experimentos, revisando y mejorando lo que sabemos. A menudo, tomamos caminos equivocados o descubrimos después de muchos años que una descripción o teoría en particular es errónea, o sólo es una aproximación a la realidad. A veces se hacen nuevos descubrimientos que nos sorprenden y nos obligan a revisar nuestra visión por completo.

Un hermoso ejemplo de esto que sucedió en mi vida fue el descubrimiento, en 1998, de que el universo se está expandiendo a un ritmo acelerado, lo que llevó a la idea de la llamada energía oscura. Hasta hace poco esto se consideraba un completo misterio. ¿Qué era este campo invisible que actuaba para estirar el espacio contra la fuerza de la gravedad? Poco a poco, vamos aprendiendo que lo más probable es que se trate de algo llamado energía del vacío. Quizás te preguntes cómo cambiar el nombre de algo (de “energía oscura” a “energía del vacío”) puede constituir un avance en nuestra comprensión. Pero el concepto de energía del vacío no es nuevo. Einstein lo había sugerido hace cien años, pero luego cambió de opinión cuando pensó que había cometido un error y lo calificó como su "mayor error". Son historias como ésta las que, para mí, hacen que la física sea tan alegre.

Esta es también la razón *El libro de física* es muy agradable. Cada tema se hace más accesible y legible con la introducción de figuras clave, anécdotas fascinantes y la línea de tiempo del desarrollo de las ideas. No sólo se trata de una explicación más honesta de la forma en que avanza la ciencia, sino que también es una forma más eficaz de darle vida al tema.

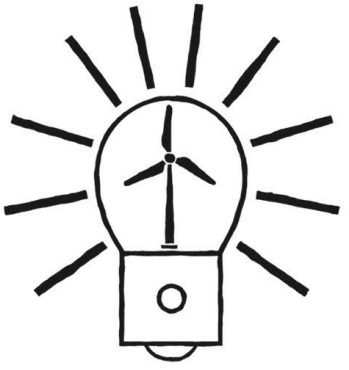
Espero que disfrutes el libro tanto como yo.



Jim Al-Khalili

INTRODUCCIÓN

CCIÓN



Los humanos tenemos un mayor sentido de nuestro entorno. Nosotros Evolucionó de esta manera para superar a los depredadores más fuertes y rápidos. Para lograrlo, hemos tenido que predecir el comportamiento tanto del mundo vivo como del inanimado. El conocimiento adquirido a partir de nuestras experiencias se transmitió de generación en generación a través de un sistema de lenguaje en constante evolución, y nuestra destreza cognitiva y capacidad para utilizar herramientas llevaron a nuestra especie a la cima de la cadena alimentaria.

Nos expandimos desde África hace unos 60.000 años, ampliando nuestras capacidades para sobrevivir en lugares inhóspitos mediante puro ingenio. Nuestros antepasados desarrollaron técnicas que les permitieron cultivar abundantes alimentos para sus familias y se establecieron en comunidades.

metodos experimentales

Las sociedades primitivas extrajeron significado de acontecimientos no relacionados, vieron patrones que no existían y tejieron mitologías. También desarrollaron nuevas herramientas y métodos de trabajo, que requerían un conocimiento avanzado del funcionamiento interno del mundo (ya fueran las estaciones o las inundaciones anuales del Nilo) para poder ampliar los recursos. En algunas regiones hubo períodos de relativa paz y abundancia. En estas sociedades civilizadas, algunos la gente era libre de preguntarse sobre nuestro lugar en el universo. Primero los griegos, luego los romanos intentaron darle sentido al mundo a través de patrones que observaron en la naturaleza. Tales de Mileto, Sócrates, Platón, Aristóteles y otros comenzaron a rechazar explicaciones sobrenaturales y a producir respuestas racionales en la búsqueda de crear conocimiento absoluto: comenzaron a experimentar.

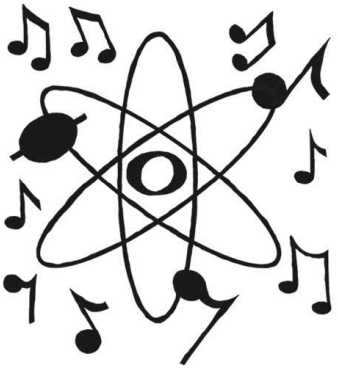
Con la caída del Imperio Romano, muchas de estas ideas se perdieron para el mundo occidental, que cayó en una era oscura de guerras religiosas, pero continuaron floreciendo en el mundo árabe y Asia. Los eruditos continuaron haciendo preguntas y realizando experimentos. El El lenguaje de las matemáticas se inventó para documentar este nuevo conocimiento. Ibn al-Haytham e Ibn Sahl fueron sólo dos de los eruditos árabes que mantuvieron viva la llama del conocimiento científico en los siglos X y XI, pero sus descubrimientos, particularmente en los campos de la óptica y la astronomía, fueron ignorados durante siglos fuera del mundo islámico. .

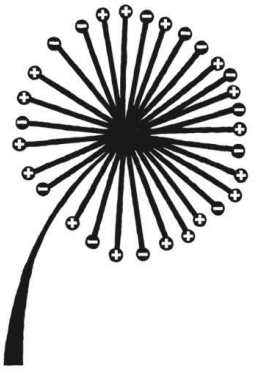
Una nueva era de ideas

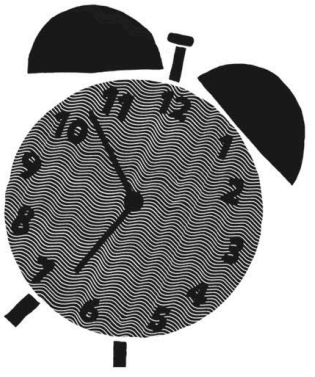
Con el comercio y la exploración globales vino el intercambio de ideas. Comerciantes y marineros llevaban libros, cuentos y material tecnológico. maravillas de este a oeste. Las ideas de esta riqueza cultural sacaron a Europa de la Edad Media y la llevaron a una nueva era de ilustración conocida como Renacimiento. Una revolución en nuestra visión del mundo comenzó cuando las ideas de las civilizaciones antiguas se actualizaron o pasaron de moda, reemplazadas por nuevas ideas sobre nuestro lugar en el universo. Una nueva generación de experimentadores hurgó y empujó a la naturaleza para extraer sus secretos. En Polonia e Italia, Copérnico y Galileo cuestionaron ideas que se habían considerado sacrosantas durante dos milenios y, como resultado, sufrieron una dura persecución.

Luego, en Inglaterra en el siglo XVII, las leyes del movimiento de Isaac Newton establecieron las bases del

> “Quien estudie obras científicas debe... examinar pruebas y explicaciones con el mayor precisión.”
> **Ibn al-Haytham**







la física clásica, que reinaría durante más de dos siglos. Comprender el movimiento nos permitió construir nuevas herramientas, máquinas, capaces de aprovechar la energía en muchas formas para realizar un trabajo. Las máquinas de vapor y los molinos de agua fueron dos de los más importantes y marcaron el comienzo de la Revolución Industrial (1760-1840).

La evolución de la física.

En el siglo XIX, los resultados de los experimentos fueron probados en numerosas ocasiones por una nueva red internacional de científicos. Compartieron sus hallazgos a través de artículos, explicando los patrones que observaron en el lenguaje de las matemáticas. Otros construyeron modelos a partir de los cuales intentaron explicar estas ecuaciones empíricas de correlación. Los modelos simplificaron las complejidades de la naturaleza en fragmentos digeribles, fácilmente descritos mediante geometrías y relaciones simples. Estos modelos hacían predicciones sobre nuevos comportamientos en la naturaleza, que fueron probadas por una nueva ola de experimentalistas pioneros; si se demostraba que las predicciones eran ciertas, los modelos se consideraban leyes que toda la naturaleza parecía obedecer. La relación entre calor y energía fue explorada por el físico francés Sadi Carnot y otros, fundando la nueva ciencia de termodinámica. El físico británico James Clerk Maxwell produjo ecuaciones para describir la estrecha relación entre la electricidad y el magnetismo: el electromagnetismo.

En 1900, parecía que existían leyes que cubrían todos los grandes fenómenos del mundo físico. Luego, en la primera década del siglo XX, una serie de descubrimientos conmocionaron a la comunidad científica, cuestionando "verdades" anteriores y dando origen a la física moderna. Un alemán, Max Planck, descubrió el mundo de la física cuántica. Entonces su compatriota Albert Einstein reveló su teoría de la relatividad. Otros descubrieron la estructura del átomo y descubrieron el papel de partículas subatómicas aún más pequeñas. Al hacerlo, iniciaron el estudio de la física de partículas. Los nuevos descubrimientos no se limitaron a lo microscópico: telescopios más avanzados abrieron el estudio del universo.

En unas pocas generaciones, la humanidad pasó de vivir en el centro del universo a residir en una mota de polvo en el borde de una galaxia entre miles de millones. No sólo habíamos visto el interior del corazón de la materia y liberado la energía interior, sino que habíamos trazado los mares del espacio con luz que había estado viajando desde poco después del Big Bang.

> Uno no puede evitar sentirse asombrado cuando contempla los misterios de la eternidad, de la vida, de lo maravilloso estructura de la realidad.
>
> **Albert Einstein**

La física ha evolucionado a lo largo de los años como ciencia, diversificándose y abriendo nuevos horizontes a medida que se realizan descubrimientos. Podría decirse que sus principales áreas de preocupación se encuentran ahora en los márgenes de nuestro mundo físico, a escalas tanto mayores que la vida como menores que los átomos. Moderno

La física ha encontrado aplicaciones en muchos otros campos, incluidas las nuevas tecnologías, la química, la biología y la astronomía. Este libro presenta las ideas más importantes de la física, comenzando con lo cotidiano y lo antiguo, pasando luego por la física clásica hasta el diminuto mundo atómico y terminando con la vasta extensión del espacio.

MEDIDA Y MOTI

la física y la mundo cotidiano

MENTO

EN

Los egipcios **usa el codo para medir distancia**y gestionar tierras de cultivo.

3000antes de Cristo

El filósofo griego Euclides escribe *Elementos*, uno de los **textos más destacados**de la época sobre**geometría y matemáticas**.

SIGLO IIIantes de Cristo

El astrónomo italiano Nicolaus. Copérnico publica*Delaware Orbium revolucionario celestio*(*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*), marcando el inicio de el**Revolución científica**.

1543

El físico holandés Christiaan Huygens**inventa el reloj de péndulo**, permitiendo científicos para precisar medir el movimiento de objetos.

1656

SIGLO IVantes de Cristo

Aristóteles desarrolla la **método científico** usando inducciones de observaciones para dibujar deducciones sobre el mundo.

1361

El filósofo francés Nicolás Oresme demuestra la**teorema de la velocidad media**, que describe la distancia cubierto por objetos sometidos aceleración constante.

1603

Galileo Galilei muestra esas bolas rodando hacia abajo planos inclinados **acelerar en el misma tasa**a pesar de todo de su masa.

Nuestros instintos de supervivencia nos han convertido en criaturas comparables. Nuestro antiguo

La lucha por sobrevivir asegurándonos de encontrar suficiente comida para nuestra familia o de reproducirnos con la pareja correcta ha sido suplantada. Estos instintos primarios han evolucionado con nuestra sociedad hasta convertirse en equivalentes modernos como la riqueza y el poder. No podemos evitar medirnos a nosotros mismos, a los demás y al mundo que nos rodea mediante métricas. Algunas de estas medidas son interpretativas y se centran en rasgos de personalidad que

punto de referencia frente a nuestros propios sentimientos. Otros, como la altura, el peso o la edad, son absolutos.

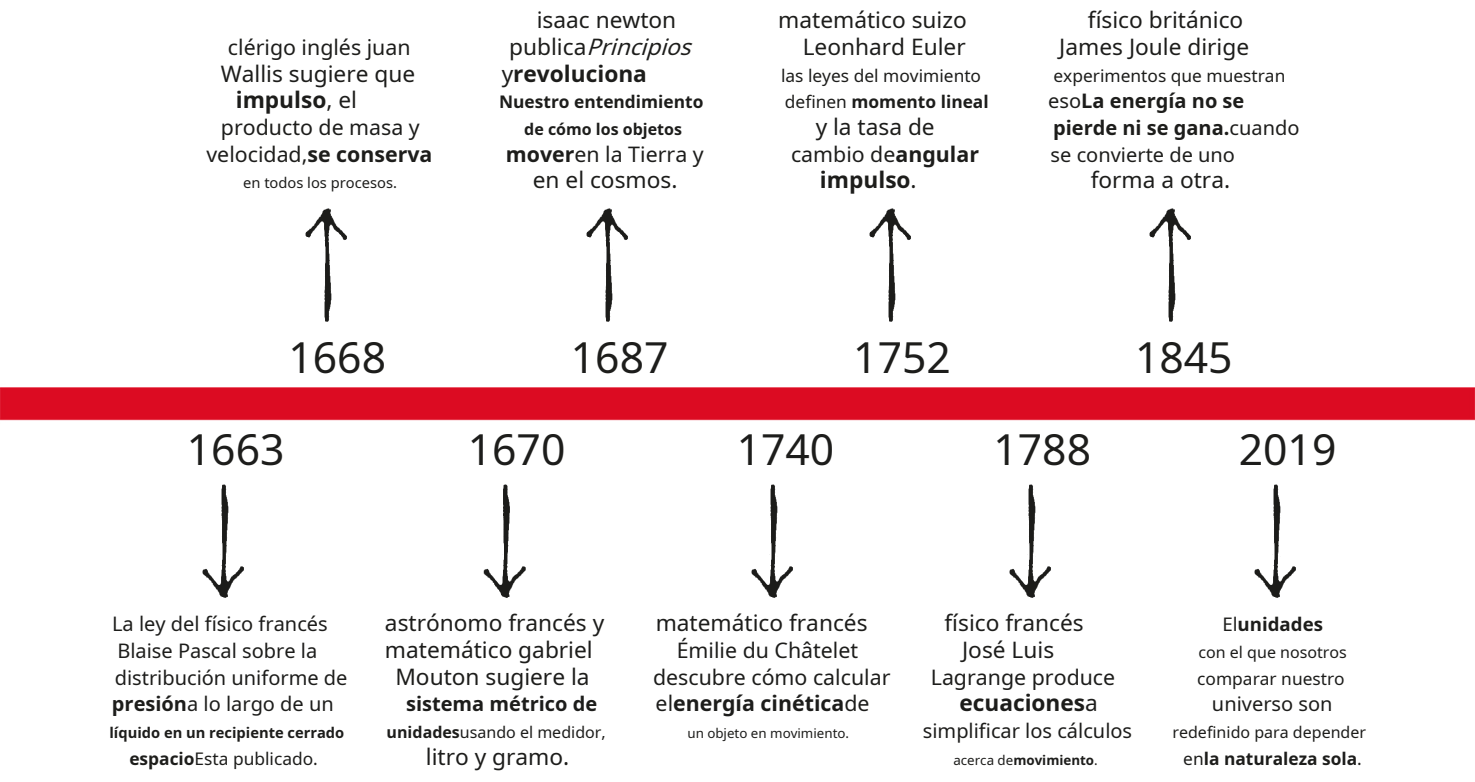
Para muchas personas, tanto en el mundo antiguo como en el moderno, una medida del éxito era la riqueza. Para amasar fortuna, los aventureros intercambiaban bienes en todo el mundo. Los comerciantes comprar abundantes bienes a bajo precio en un lugar antes de transportarlos y venderlos a un precio más alto en otro lugar donde ese bien era escaso. A medida que el comercio de bienes se volvió global, los líderes locales comenzaron a gravar el comercio e imponer precios estándar. Para hacer cumplir esto, necesitaban medidas estándar de cosas físicas que les permitieran hacer comparaciones.

Idioma de medición

Al darse cuenta de que la experiencia de cada persona es relativa, los antiguos egipcios idearon sistemas que podían comunicarse sin prejuicios de una persona a otra. Desarrollaron el primer sistema de métricas, un método estándar para medir el mundo que los rodea. El codo egipcio permitió a los ingenieros planificar edificios que no tuvieron rival durante milenios e idearon sistemas agrícolas para alimentar a la creciente población. A medida que el comercio con el antiguo Egipto se globalizó, la idea de un lenguaje común de medición difundido por todo el mundo.

La Revolución Científica (1543-1700) generó una nueva necesidad de estas métricas. Para el científico, las métricas no debían utilizarse para intercambiar bienes, sino como una herramienta para comprender la naturaleza. Desconfiando de sus instintos, los científicos desarrollaron entornos controlados en los que probaron conexiones entre diferentes comportamientos:

experimentado. Los primeros experimentos se centraron en el movimiento de objetos cotidianos, que tenían un efecto directo en la vida diaria. Los científicos descubrieron patrones



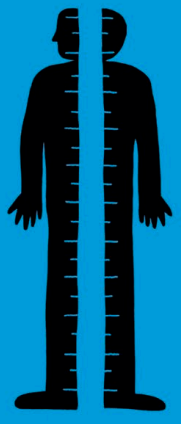
en movimientos oscilantes lineales, circulares y repetitivos. Estos patrones quedaron inmortalizados en el lenguaje de las matemáticas, un regalo de civilizaciones antiguas que luego se habían desarrollado en el mundo islámico durante siglos. Las matemáticas ofrecían una forma inequívoca de compartir los resultados de experimentos y permitió a los científicos hacer predicciones y probarlas con nuevos experimentos. Con un lenguaje y una métrica comunes, la ciencia avanzó. Estos pioneros descubrieron vínculos entre distancia, tiempo y velocidad y expusieron su propia explicación de la naturaleza, repetible y probada.

Medición del movimiento

Las teorías científicas progresaron rápidamente y con ellas cambió el lenguaje de las matemáticas. Edificio Basándose en sus leyes del movimiento, el físico inglés Isaac Newton inventó el cálculo, que aportó una nueva capacidad para describir el cambio de los sistemas a lo largo del tiempo, no sólo calcular instantáneas individuales. Para explicar la aceleración de los objetos que caen y, finalmente, la naturaleza del calor, comenzaron a surgir ideas sobre una entidad invisible llamada energía. Nuestro mundo ya no podía definirse únicamente por la distancia, el tiempo y la masa, y se necesitaban nuevas métricas para comparar la medición de la energía.

Los científicos utilizan métricas para transmitir los resultados de los experimentos. Las métricas proporcionan un lenguaje inequívoco que permite a los científicos interpretar los resultados de un experimento y repetirlo para comprobar que sus conclusiones son correctas. Hoy en día, los científicos utilizan el Système colección internacional (SI) de métricas para transmitir sus resultados. El valor de cada una de estas métricas del SI y su vínculo con el mundo que nos rodea lo define y decide un grupo internacional de científicos conocidos como metrólogos.

Este primer capítulo traza estos primeros años de la ciencia que hoy llamamos física, la forma en que la ciencia opera a través de la experimentación y cómo los resultados de estas pruebas se comparten en todo el mundo. Desde los objetos que caían que el erudito italiano Galileo Galilei utilizó para estudiar la aceleración hasta los péndulos oscilantes que allanaron el camino para el cronometraje preciso, esta es la historia de cómo los científicos comenzaron a medir la distancia, el tiempo, la energía y el movimiento, revolucionando nuestra comprensión de lo que hace el mundo funciona.



EL HOMBRE ES EL MEDIDA DE TODAS LAS COSAS

MEDICIÓN DE DISTANCIA

EN CONTEXTO

CIVILIZACIÓN CLAVE
Antiguo Egipto

ANTES

c.4000antes de Cristo Los administradores utilizan un sistema para medir el tamaño de los campos en la antigua Mesopotamia.

C. 3100antes de Cristo Los funcionarios del antiguo Egipto utilizaban cuerdas anudadas (cuerdas preestiradas atadas a intervalos regulares) para medir el terreno y examinar los cimientos de los edificios.

DESPUÉS

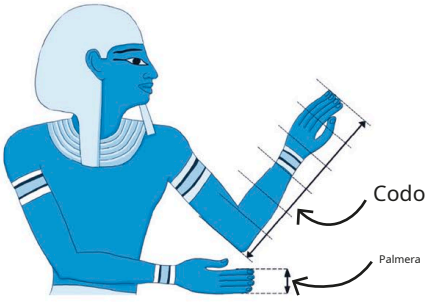
1585 En los Países Bajos, Simon Stevin propone un sistema numérico decimal.

1799 El gobierno francés adopta el metro.

1875 Firmada por 17 naciones, la Convención del Metro acuerda una longitud constante para la unidad.

1960 La undécima Conferencia General de Pesas y Medidas establece el sistema métrico como el Sistema Internacional de Unidades ("SI", del francés Système international).

Cuando la gente empezó a construir estructuras a escala organizada, Necesitaba una forma de medir la altura y la longitud. Es probable que los primeros dispositivos de medición fueran palos de madera primitivos marcados con muescas, sin una consistencia aceptada en la unidad de longitud. La primera unidad generalizada fue el "codo", que surgió en el cuarto y tercer milenio.antes de Cristoentre los pueblos de Egipto, Mesopotamia y el valle del Indo. El término codo deriva del latín que significa codo,*cubito*, y era la distancia desde el codo hasta la punta del dedo medio extendido. Por supuesto, no todo el mundo tiene la misma longitud de antebrazo y dedo medio, por lo que este "estándar" era sólo aproximado.



El codo real egipciose basó en la longitud del antebrazo, medida desde el codo hasta la punta del dedo medio. Los codos se subdividían en 28 dígitos (cada uno de ellos de un dedo de largo) y una serie de unidades intermedias, como las palmas y las manos.

medida imperial

Como prodigiosos arquitectos y constructores de monumentos a gran escala, los antiguos egipcios necesitaban una unidad estándar de distancia. Oportunamente, el codo real del Antiguo Reino del antiguo Egipto es la primera medida de codo estandarizada conocida en el mundo. En uso desde al menos 2700antes de Cristo, tenía entre 20,6 y 20,8 pulgadas (523 y 529 mm) de largo y estaba dividido en 28 dígitos iguales, cada uno de ellos basado en el ancho de un dedo.

Las excavaciones arqueológicas de las pirámides han revelado varillas de madera, pizarra, basalto y bronce, que habrían sido utilizadas como medidas por artesanos y arquitectos. La Gran Pirámide de Giza, donde se encontró una vara de codo en la Cámara del Rey, fue construida para tener 280 codos de altura, con una base de 440 codos cuadrados. Los egipcios subdividieron además los codos en palmas (4 dígitos), manos (5 dígitos), tramos pequeños (12 dígitos), tramos grandes (14 dígitos o medio codo) y*t'sers*(16 dígitos o

Ver también: Caída libre 32–35 · Tiempo de medición 38–39 · unidades SI y fisicas constantes 58–63 Calor y transferencias 80–81

Varillas de codo—como este ejemplo de la dinastía XVIII en el antiguo Egipto, c. siglo 14 antes de Cristo—Se utilizaron ampliamente en el mundo antiguo para lograr mediciones consistentes.

4 palmas). El *khet* (100 codos) se utilizó para medir los límites del campo y el *comer* (20.000 codos) para definir distancias mayores.

En todo Oriente Medio se utilizaron codos de diversas longitudes. Los asirios usaron codos en c. 700 antes de Cristo, mientras que la Biblia hebrea contiene abundantes referencias a los codos, particularmente en el relato del Libro del Éxodo sobre la construcción del Tabernáculo, la tienda sagrada que albergaba los Diez Mandamientos. Los antiguos griegos desarrollaron su propio codo de 24 unidades, así como el *estadio* (plural *estadios*), una nueva unidad que representa 300 codos. En el siglo III antes de Cristo, el erudito griego Eratóstenes (c. 276 antes de Cristo-C. 194 antes de Cristo) estimó la circunferencia de la Tierra en 250.000 estadios, cifra que luego refinó hasta 252.000 estadios. Los romanos también adoptaron el codo, junto con la pulgada: un adulto pulgar del macho: pie y milla. La milla romana era de 1.000 pasos, o *mil millas*, cada uno de los cuales medía cinco pies romanos. RExpansión colonial omaní desde el siglo III. antes de Cristo al siglo III CE introdujo estas unidades en gran parte de Asia occidental y Europa, incluida Inglaterra, donde la reina Isabel I redefinió la milla como 5280 pies en 1593.

> Harás armazones verticales de madera de acacia para el tabernáculo. Cada tabla tendrá diez codos de largo y un codo y medio de ancho.
>
> **Éxodo 26:15–16**
>
> **La biblia**

Ir métrico

En su folleto de 1585 *De Thiende* (*El arte de las décimas*), el físico flamenco Simon Stevin propuso un sistema de medición decimal, previendo que, con el tiempo, sería ampliamente aceptado. Más de dos siglos después, un comité de la Academia Francesa de Ciencias comenzó a trabajar en el sistema métrico, definiendo el metro como una diezmillonésima parte de la distancia entre el ecuador de la Tierra y el Polo Norte. Francia se convirtió en la primera nación en adoptar la medida, en 1799.

El reconocimiento internacional no se alcanzó hasta 1960, cuando el Sistema Internacional (SI) estableció el metro como unidad base para la distancia. Se acordó que 1 metro (m) equivale a 1.000 milímetros (mm) o 100 centímetros (cm), y 1.000 m equivalen a 1 kilómetro (km).

Cambiar definiciones

En 1668, el clérigo inglés John Wilkins siguió la propuesta de Stevin de una unidad de longitud basada en decimales con una definición novedosa: sugirió que se debería establecer 1 metro como la distancia de una oscilación de péndulo de dos segundos. Holandés El físico Christiaan Huygens (1629-1695) calculó que era 39,26 pulgadas (997 mm).

En 1889, se fundió una barra de aleación de platino (90%) e iridio (10%) para representar la longitud definitiva de 1 metro, pero debido a que se expandía y contraía muy ligeramente a diferentes temperaturas, sólo era precisa en el punto de fusión de hielo. Esta barra todavía se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas en París, Francia. Cuando se adoptaron las definiciones del SI en 1960, el metro se redefinió en términos de la longitud de onda de las emisiones electromagnéticas de un átomo de criptón. En 1983 se adoptó otra definición: la distancia que recorre la luz en el vacío en 1/299.792.458 de segundo.

> Una milla contendrá ocho estadios, cada estadio cuarenta postes, y cada poste contendrá dieciséis pie y medio.
>
> **Reina Isabel I**

UN PRUDENTE LA PREGUNTA ES LA MITAD DE SABIDURÍA

EL MÉTODO CIENTÍFICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE

Aristóteles (C. 384–322 antes de Cristo)

ANTES

585 antes de Cristo Tales de Mileto, un matemático griego y filósofo, analiza los movimientos del sol y la luna para pronosticar un eclipse solar.

DESPUÉS

1543 de Nicolás Copérnico *De Revolutionibus orbium celestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*) y de Andrés Vesalio *De humani corporis fabric* (*Sobre el funcionamiento del cuerpo humano*) se basan en observaciones detalladas, lo que marcó el comienzo de la Revolución Científica.

1620 Francis Bacon propone el método inductivista, que implica hacer generalizaciones basadas en observaciones precisas.

Una observación atenta y una actitud cuestionadora ante los hallazgos son fundamentales para el método científico de investigación, que sustenta la física y todas las ciencias. Dado que es fácil que los conocimientos y suposiciones previos distorsionen la interpretación de los datos, el método científico sigue un procedimiento establecido. Se elabora una hipótesis sobre la base de los hallazgos y luego se prueba experimentalmente. Si esta hipótesis falla, se puede revisar y reexaminar, pero si es sólida, se comparte para revisión por pares.

Evaluación independiente por parte de expertos.

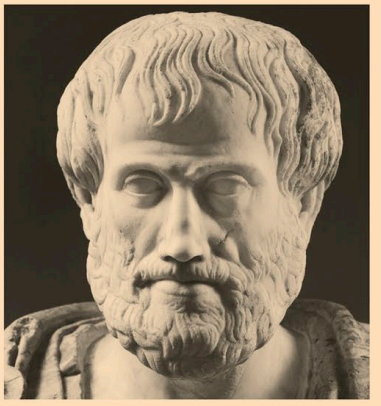
La gente siempre ha buscado comprender el mundo que los rodea y la necesidad de encontrar alimento y

Ver también: Caída libre 32–35 · Unidades SI y constantes físicas 58–63 Enfoque luz 170–175 · Modelos del universo 272–273 Materia oscura 302–305

Comprender que el cambio climático era una cuestión de vida o muerte mucho antes de que se escribieran las ideas. En muchas sociedades, se desarrollaron mitologías para explicar los fenómenos naturales; en otros lugares se creía que todo era un regalo de los dioses y que los acontecimientos estaban predeterminados.

Investigaciones tempranas

Las primeras civilizaciones del mundo (la antigua Mesopotamia, Egipto, Grecia y China) fueron lo suficientemente avanzado como para apoyar a los "filósofos naturales", pensadores que buscaban interpretar el mundo y registrar sus hallazgos. Uno de los primeros en rechazar las explicaciones sobrenaturales de los fenómenos naturales fue el pensador griego Tales de Mileto. Más tarde, los filósofos Sócrates y Platón introdujeron el debate y la argumentación como método para mejorar la comprensión, pero fue Aristóteles, un prolífico investigador de física, biología y zoología, quien comenzó a desarrollar un método científico de investigación, aplicando el razonamiento lógico a los fenómenos observados. Era un empirista, alguien--



Aristóteles

Aristóteles, hijo del médico de la corte de la familia real macedonia, fue criado por un tutor después de que sus padres murieran cuando él era joven. Alrededor de los 17 años, ingresó en la Academia de Platón en Atenas, el centro de aprendizaje más importante de Grecia. Durante las siguientes dos décadas, estudió y escribió sobre filosofía, astronomía, biología, química, geología y física, así como sobre

Política, poesía y música. También viajó a Lesbos, donde realizó observaciones innovadoras de la botánica y la zoología de la isla.

Cª.343 antes de Cristo, Aristóteles fue invitado por Felipe II de Macedonia para ser tutor de su hijo, el futuro Alejandro Magno. Él estableció una escuela en el Liceo de Atenas en 335 antes de Cristo, donde escribió muchos de sus tratados científicos más célebres. Aristóteles abandonó Atenas en el año 322. antes de Cristo y se estableció en la isla de Eubea, donde murió aproximadamente a la edad de 62 años.

Trabajos clave

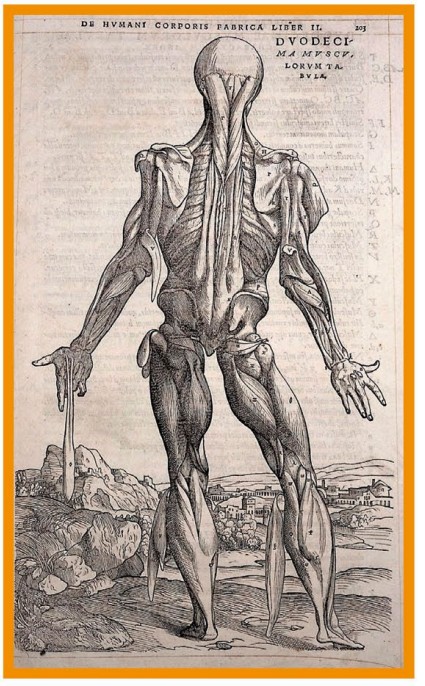
Metafísica
En los cielos
Física

> Todas las verdades son
> fácil de comprender
> una vez que estén
> descubierto; el punto
> es descubrirlos.
> **Galileo Galilei**

quien cree que todo conocimiento se basa en la experiencia derivada de los sentidos, y que la razón por sí sola no es suficiente para resolver problemas científicos: se requieren pruebas.

Aristóteles, que viajó mucho, fue el primero en realizar observaciones zoológicas detalladas, buscando evidencia para agrupar los seres vivos por comportamiento y anatomía. Se hizo a la mar con pescadores para recolectar y diseccionar peces y otros organismos marinos. Después de descubrir que los delfines tienen pulmones, consideró que deberían clasificarse con las ballenas, no con los peces. Separó los animales de cuatro patas que dan a luz a crías vivas (mamíferos) de los que ponen huevos (reptiles y anfibios).

Sin embargo, en otros campos Aristóteles todavía estaba influenciado por ideas tradicionales que carecían de una base científica buena. No cuestionó la idea geocéntrica predominante de que el sol y las estrellas giran alrededor de la Tierra. En el siglo IIIantes de Cristo, otro pensador griego, Aristarco de Samos, argumentó que la Tierra y los planetas conocidos orbitan alrededor del Sol, que las estrellas son equivalentes muy distantes de "nuestro" Sol y que la Tierra gira sobre su eje. Aunque correctas, estas ideas fueron descartadas porque Aristóteles y su alumno Ptolomeo llevaron

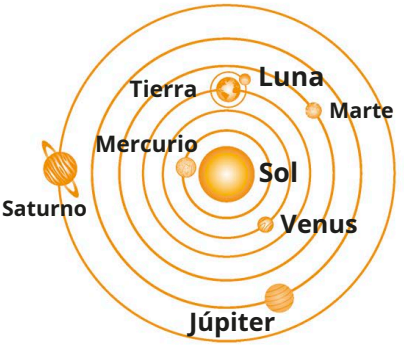


Dibujos anatómicosde 1543 reflejan el dominio de la disección de Vesalio y establecieron un nuevo estándar para el estudio del cuerpo humano, sin cambios desde el médico griego Galeno (129-216).CE).

mayor autoridad. De hecho, la visión geocéntrica del universo se consideró cierta (debido en parte a que la Iglesia Católica la impuso, que desalentaba las ideas que desafiaban su interpretación de la Biblia) hasta que fue reemplazada en el siglo XVII por las ideas de Copérnico. , Galileo y Newton.

Pruebas y observación

El erudito árabe Ibn al-Haytham (ampliamente conocido como "Alhazen") fue uno de los primeros defensores del método científico. Trabajando en los siglos X y XICE, desarrolló su propio método de experimentación para probar o refutar hipótesis. Su trabajo más importante fue en el campo de la óptica, pero también hizo importantes contribuciones a la astronomía y las matemáticas. Al-Haytham experimentó con la luz solar, la luz reflejada por fuentes de luz artificiales y la luz refractada. Por ejemplo, probó (y demostró) la hipótesis de que cada



El modelo heliocéntrico de Copérnico, llamado así porque hizo el sol (*helios*en griego), el foco de las órbitas planetarias, fue respaldado por algunos científicos pero prohibido por la Iglesia.

El punto de un objeto luminoso irradia luz a lo largo de cada línea recta y en todas direcciones.

Desafortunadamente, los métodos de al-Haytham no se adoptaron más allá del mundo islámico, y pasarían 500 años antes de que un enfoque similar surgiera de forma independiente en Europa, durante la Revolución Científica. Pero la idea de que las teorías aceptadas pueden ser cuestionadas y derribadas si se puede demostrar una alternativa no era la opinión predominante en la Europa del siglo XVI. Las autoridades de la Iglesia rechazaron muchas ideas científicas, como el trabajo del astrónomo polaco Nicolás Copérnico. Hizo minuciosas observaciones del cielo nocturno a simple vista, explicando el movimiento retrógrado temporal ("hacia atrás") de los planetas, que el geocentrismo nunca había explicado. Copérnico se dio cuenta de que el fenómeno se debía a que la Tierra y los demás planetas se movían alrededor del Sol en órbitas diferentes. Aunque Copérnico carecía de las herramientas para demostrar el heliocentrismo, su uso

> Si un hombre comienza con certezas, terminará en dudas, pero si se contenta Para comenzar con dudas, terminará en certezas.
>
> **Francis Bacon**

de argumento racional para desafiar el pensamiento aceptado lo distingue como un verdadero científico. Casi al mismo tiempo, el anatomista flamenco Andreas Vesalio transformó el pensamiento médico con su trabajo de varios volúmenes sobre el cuerpo humano en 1543. Así como Copérnico basó sus teorías en observaciones detalladas, Vesalio analizó lo que encontró al diseccionar partes del cuerpo humano.

Enfoque experimental

Para el erudito italiano Galileo Galilei, la experimentación era fundamental para el enfoque científico. el con cuidado registró observaciones sobre temas tan variados como el movimiento de los planetas, la oscilación de los péndulos y la velocidad de la caída de los cuerpos. Produjo teorías para explicarlas y luego hizo más observaciones para probarlas. Utilizó la nueva tecnología de telescopios para estudiar cuatro de las lunas que orbitan alrededor de Júpiter, demostrando el modelo heliocéntrico de Copérnico: bajo el geocentrismo, todos los objetos orbitaban la Tierra. En 1633, Galileo fue juzgado por la Inquisición Romana de la Iglesia, declarado culpable de herejía y puesto bajo arresto domiciliario durante la última década de su vida. Continuó publicando mediante el contrabando de periódicos a Holanda, lejos de la censura de la Iglesia.

Más adelante, en el siglo XVII, el filósofo inglés Francis Bacon reforzó la importancia de un enfoque metódico y escéptico de la investigación científica. Bacon argumentó que el único medio de construir conocimiento verdadero era basar axiomas y leyes en hechos observados, sin depender (aunque sólo sea parcialmente) de deducciones y conjeturas no comprobadas. El método baconiano implica realizar observaciones sistemáticas para establecer hechos verificables; generalizando a partir de una serie de hechos para crear axiomas (un proceso conocido como “inductivismo”), teniendo cuidado de evitar generalizar más allá de lo que nos dicen los hechos; luego reúne más datos para producir una base de conocimiento cada vez más compleja.

Ciencia no probada

Cuando las afirmaciones científicas no pueden verificarse, no necesariamente son erróneas. En 1997, los científicos del laboratorio Gran Sasso en Italia afirmaron haber detectado evidencia de materia oscura, que se cree que constituye alrededor del 27 por ciento del universo. La fuente más probable, dijeron, fueron las partículas masivas que interactúan débilmente (WIMP). Estos deberían detectarse como pequeños destellos de luz (centelleos) cuando una partícula choca contra el núcleo de un átomo "objetivo". Sin embargo, a pesar de los mejores esfuerzos de otros equipos de investigación para replicar el experimento, no se ha encontrado ninguna otra evidencia de materia oscura.

Es posible que exista una explicación no identificada, o que los centelleos hayan sido producidos por átomos de helio, que están presentes en los tubos fotomultiplicadores del experimento.-

Foto 51, tomada por Franklin, es una imagen de difracción de rayos X del ADN humano de 1952. La forma de X se debe a la estructura de doble hélice del ADN.

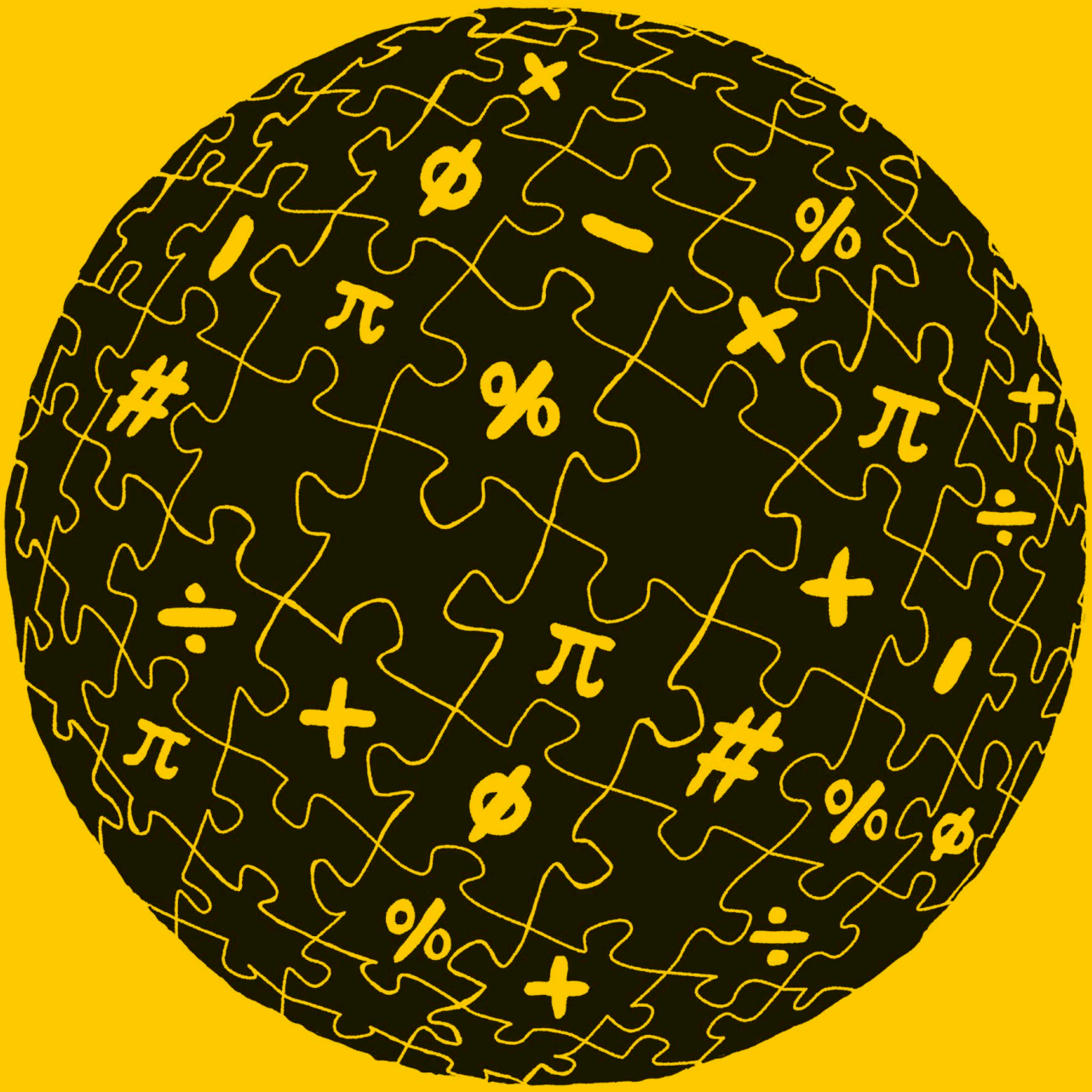
El método científico en la práctica.

El ácido desoxirribonucleico (ADN) fue identificado como el portador de información genética en el cuerpo humano en 1944, y se demostró que su composición química consta de cuatro moléculas diferentes llamadas nucleótidos. Sin embargo, no estaba claro cómo se almacenaba la información genética en el ADN. Tres científicos: Linus Pauling, Francis Crick y James Watson: propuso la hipótesis de que el ADN poseía una estructura helicoidal y, a partir del trabajo realizado por otros científicos, se dio cuenta de que, si ese fuera el caso, sus rayos X El patrón de difracción tendría forma de X. La científica británica Rosalind Franklin probó esta teoría realizando difracción de rayos X en ADN puro cristalizado, a partir de 1950. Después de perfeccionar la técnica durante un período de dos años, su análisis reveló un patrón en forma de X (que se ve mejor en la “Foto 51”) ,

demostrando que el ADN tenía una estructura helicoidal. Se demostró la hipótesis de Pauling, Crick y Watson, lo que sirvió de punto de partida para futuros estudios sobre el ADN.

TODO ES NÚMERO

EL LENGUAJE DE LA FÍSICA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Euclides de Alejandría
(hacia 325-hacia 270antes de Cristo)

ANTES
3000–300antes de Cristo Antiguo
Las civilizaciones mesopotámica y egipcia desarrollaron sistemas numéricos y técnicas para resolver problemas matemáticos.

600–300antes de Cristo Los eruditos griegos, incluidos Pitágoras y Tales, formalizan las matemáticas utilizando lógica y pruebas.

DESPUÉS
C. 630CE El matemático indio Brahmagupta utiliza cero y negativo
números en aritmética.

C. 820CE El erudito persa al-Khwarizmi establece
Los principios del álgebra.

C. 1670 Gottfried Leibniz e Isaac Newton desarrollan cada uno el cálculo, el estudio matemático del cambio continuo.

PAG

La física busca comprender el universo a través de observación, experimento, y construcción de modelos y teorías. Todos estos están íntimamente entrelazados con las matemáticas. Las matemáticas son el lenguaje de la física, ya sea que se utilicen en mediciones y análisis de datos en la ciencia experimental, o para proporcionar una expresión rigurosa de teorías, o para describir el "marco de referencia" fundamental en el que existe toda la materia y tienen lugar los eventos. La investigación del espacio, el tiempo, la materia y la energía sólo es posible mediante una comprensión previa de la dimensión, la forma, la simetría y el cambio.

Impulsado por necesidades prácticas

La historia de las matemáticas es una de creciente abstracción. Las primeras ideas sobre el número y la forma se desarrollaron con el tiempo hasta convertirse en el lenguaje más general y preciso.
En tiempos prehistóricos, antes de la llegada de la escritura, el pastoreo de animales y el comercio de mercancías sin duda impulsaron los primeros intentos de contar y contar.

A medida que surgieron culturas complejas en Medio Oriente y Mesoamérica, surgieron demandas de mayor precisión y

> El número es el regente de las formas y las ideas, y la causa de dioses y demonios.
> **Pitágoras**

La predicción aumentó. El poder estaba ligado al conocimiento de los ciclos astronómicos y los patrones estacionales, como las inundaciones. La agricultura y la arquitectura requerían calendarios y estudios topográficos precisos.
Los primeros sistemas numéricos de valor posicional (donde la posición de un dígito en un número indica su valor) y los métodos para resolver ecuaciones se remontan a más de 3500 años en civilizaciones de Mesopotamia, Egipto y (más tarde) Mesoamérica.

Agregar lógica y análisis

El ascenso de la antigua Grecia provocó un cambio fundamental de enfoque. Sistemas numéricos y

Euclides

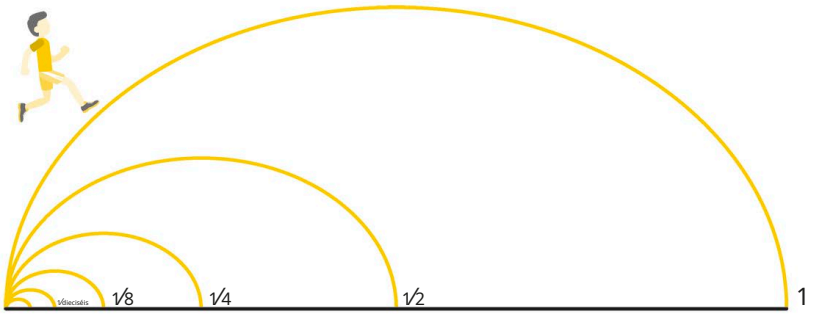
Aunque su *Elementos* fueron inmensamente influyentes, se conocen pocos detalles de la vida de Euclides. Nació alrededor del año 325. antes de Cristo, en el reinado del faraón egipcio Ptolomeo I y probablemente murió alrededor del año 270antes de Cristo. Vivió principalmente en Alejandría, entonces un importante centro de aprendizaje, pero es posible que también haya estudiado en la academia de Platón en Atenas.

En *Comentario sobre Euclides*, escrito en el siglo VCE, el filósofo griego Proclo señala que Euclides ordenó los teoremas de Eudoxo, un matemático griego anterior, y aportó una "demostración irrefutable" a las ideas vagas de otros eruditos. Así, los teoremas de los 13 libros de Euclides *Elementos* no son originales, pero durante dos milenios establecieron el estándar para la exposición matemática. Las primeras ediciones que se conservan del *Elementos* datan del siglo XV.

Trabajos clave

Elementos
Datos
Catóptrica
Óptica

Ver también: Medición de distancia 18–19 · Tiempo de medición 38–39 Leyes del movimiento 40–45 · unidades SI y fisicas constantes 58–63 · Antimateria 246 El zoológico de partículas y los quarks 256-257 · Curvar el espacio-tiempo 280



La paradoja de la dicotomía es una de las paradojas de Zenón que muestra que el movimiento es lógicamente imposible. Antes de caminar una cierta distancia una persona debe caminar la mitad de esa distancia, antes de caminar la mitad de la distancia debe caminar un cuarto de la distancia, y así sucesivamente. Por lo tanto, caminar cualquier distancia implicará un número infinito de etapas que requieren una cantidad de tiempo infinita para completarse.

las mediciones ya no eran simplemente herramientas prácticas; Los eruditos griegos también los estudiaron por sí mismos, junto con la forma y el cambio. Aunque heredaron muchos conocimientos matemáticos específicos de culturas anteriores, como elementos del teorema de Pitágoras, los griegos introdujeron el rigor del argumento lógico y un enfoque arraigado en la filosofía; la palabra griega antigua *filosofía* significa "amor a la sabiduría".

Las ideas de teorema (una afirmación general que es verdadera en todas partes y para todos los tiempos) y prueba (un argumento formal que utiliza las leyes de la lógica) se ven por primera vez en la geometría del filósofo griego Tales de Mileto a principios del siglo VI. antes de Cristo. Casi al mismo tiempo, Pitágoras y sus seguidores elevaron los números a la categoría de bloques de construcción del universo.

Para los pitagóricos, los números tenían que ser “conmensurables” (medibles en términos de proporciones o fracciones) para preservar el vínculo con la naturaleza. Esta visión del mundo se hizo añicos con el descubrimiento de los números irracionales (como $\sqrt{2}$, que no puede expresarse exactamente como un número entero dividido por otro) por el filósofo pitagórico Hippasus; Según la leyenda, fue asesinado por compañeros escandalizados.

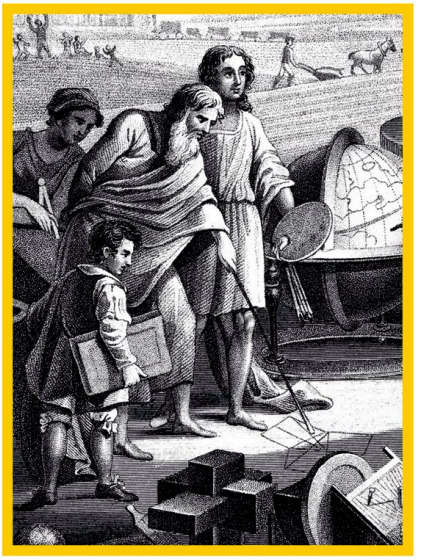
Titanes de las matemáticas

En el siglo V antes de Cristo, el filósofo griego Zenón de Elea ideó paradojas sobre el movimiento, como la de Aquiles y la tortuga. Ésta era la idea de que, en cualquier carrera en la que el perseguido tiene una ventaja, el perseguidor siempre acaba alcanzándolo por una cantidad infinitesimal. Estos acertijos, que eran lógicos (si bien fáciles de refutar en la práctica), preocuparían a generaciones de matemáticos. Se resolvieron, al menos parcialmente, en el siglo XVII con el desarrollo del cálculo, una rama de las matemáticas que se ocupa continuamente

cantidades modificadas.

Un elemento central del cálculo es la idea de calcular infinitesimales (cantidades infinitamente pequeñas), que fue anticipada por Arquímedes de Siracusa, que vivió en el siglo III. antes de Cristo. Para calcular el volumen aproximado de una esfera, por ejemplo, la partió por la mitad, encerró el hemisferio en un cilindro y luego se imaginó cortándolo horizontalmente, desde la parte superior del hemisferio, donde el radio es infinitamente pequeño, hacia abajo. Sabía que cuanto más finas hiciera las rebanadas, más preciso sería el volumen. Se dice que gritó "¡Eureka!" Al descubrir que la fuerza de flotación hacia arriba de un objeto sumergido en agua es igual al peso del fluido que desplaza, Arquímedes se destacó por aplicar las matemáticas a la mecánica y otras ramas de la física para resolver problemas que involucraban palancas, tornillos, poleas y zapatillas.

Arquímedes estudió en Alejandría, en una escuela establecida por Euclides, a menudo conocido como el "Padre de la Geometría". fue por-



filósofos griegos dibujó en la arena cuando enseñaba geometría, como se muestra aquí. Se dice que Arquímedes estaba dibujando círculos en la arena cuando un soldado romano lo mató.

Al analizar la geometría misma, Euclides estableció el modelo para la argumentación matemática durante los siguientes 2.000 años. Su tratado de 13 libros, *Elementos*, introdujo el "método axiomático" para la geometría. Definió términos como “punto” y esbozó cinco axiomas (también conocidos como postulados o verdades evidentes), como “un segmento de línea se puede dibujar entre dos puntos cualesquiera”. A partir de estos axiomas, utilizó las leyes de la lógica para deducir teoremas.

Según los estándares actuales, los axiomas de Euclides faltan; Existen numerosos supuestos que un matemático esperaría ahora que se establecieran formalmente. *Elementos* Sigue siendo, sin embargo, una obra prodigiosa, que abarca no sólo la geometría plana y la geometría tridimensional, sino también la razón y la proporción, la teoría de números y los "inconmensurables" que los pitagóricos habían rechazado.

Lenguaje y símbolos

En la antigua Grecia y antes, los eruditos describían y resolvían problemas algebraicos (determinación de cantidades desconocidas dadas ciertas cantidades y relaciones conocidas) en el lenguaje cotidiano y mediante el uso de la geometría. El muy abreviado, El lenguaje preciso y simbólico de las matemáticas modernas, que es significativamente más eficaz para analizar problemas y universalmente comprendido, es relativamente reciente. Alrededor de 250 CE Sin embargo, el matemático griego Diofanto de Alejandría introdujo el uso parcial de símbolos para resolver problemas algebraicos en su obra principal. *aritmética*, que influyó en el desarrollo del álgebra árabe después de la caída del Imperio Romano.

El estudio del álgebra floreció en Oriente durante la Edad de Oro del Islam (del siglo VIII al siglo XIV). Bagdad se convirtió en la principal sede del saber. Aquí, en un centro académico llamado Casa de la Sabiduría, los matemáticos podían estudiar traducciones de textos griegos sobre geometría y teoría de números u obras indias que analizaban el sistema de valor posicional decimal.

A principios del siglo IX, Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi (de cuyo nombre proviene la palabra "algoritmo") compiló métodos para equilibrar y resolver ecuaciones en su libro. *al-jabr* (la raíz de la palabra “álgebra”). Popularizó el uso de los números hindúes, que evolucionaron hasta convertirse en números arábigos, pero aún así describió sus problemas algebraicos con palabras.

Los eruditos islámicos se reúnen en una de las grandes bibliotecas de Bagdad en esta imagen de 1237 del pintor Yahya al-Wasiti. A la ciudad llegaron eruditos de todos los puntos del Imperio Islámico, incluidos Persia, Egipto, Arabia e incluso Iberia (España).

> Los números imaginarios están bien.
> y maravilloso refugio de la
> espíritu divino... casi un
> anfibio entre ser
> y el no ser.
> **Gottfried Leibniz**

El matemático francés François Viète finalmente fue pionero en el uso de símbolos en ecuaciones en su libro de 1591, *Introducción a las artes analíticas*. El lenguaje aún no era estándar, pero los matemáticos ahora podían escribir expresiones complicadas en forma compacta, sin recurrir a diagramas. En 1637, el filósofo y matemático francés René Descartes reunió el álgebra y la geometría ideando el sistema de coordenadas.

Números más abstractos

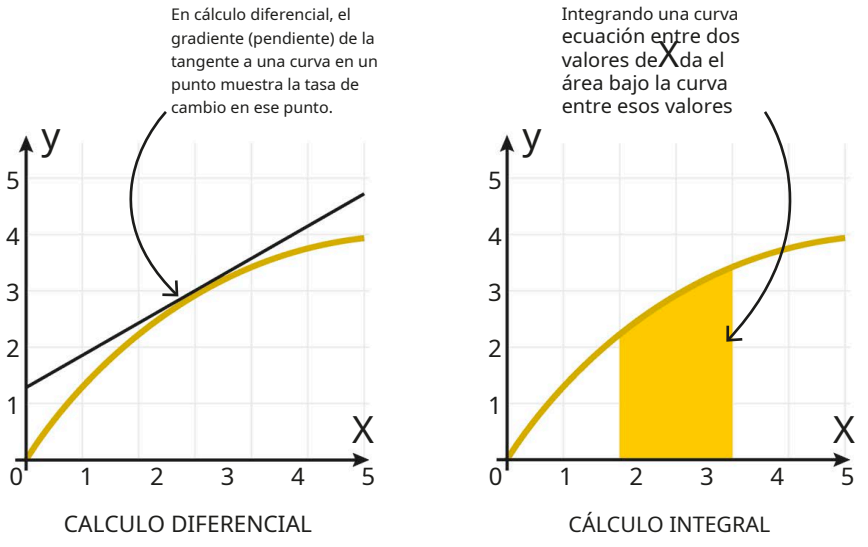
A lo largo de milenios, en un intento por resolver diferentes problemas, los matemáticos han ampliado el sistema numérico, ampliando los números de conteo 1, 2, 3... para incluir fracciones y números irracionales. La suma de cero y números negativos indicaba una creciente abstracción.

En los sistemas numéricos antiguos, el cero se utilizaba como marcador de posición (una forma de distinguir 10 de 100, por ejemplo). Alrededor del siglo VII CE,

Se utilizaron números negativos para representar las deudas. En 628CE, El matemático indio Brahmagupta fue el primero en tratar los números enteros negativos (números enteros) como los números enteros positivos en aritmética. Sin embargo, incluso 1.000 años después, muchos estudiosos europeos todavía consideraban que los números negativos eran inaceptables como soluciones formales a ecuaciones.

El erudito italiano del siglo XVI Gerolamo Cardano no sólo utilizó números negativos, sino que, en*Ars Magna*, introdujo la idea de números complejos (combinando un número real e imaginario) para resolver ecuaciones cúbicas (aquellas con al menos una variable elevada a tres, comox^3, pero no superior). Los números complejos toman la forma $a+bi$, dónde$a$y$b$son números reales y$i$es lo imaginario unidad, generalmente expresada como$i=\sqrt{-1}$. La unidad se denomina "imaginaria" porque cuando se eleva al cuadrado es negativo, y elevar al cuadrado cualquier número real, ya sea positivo o negativo, produce un número positivo. Aunque el contemporáneo de Cardano, Rafael Bombelli

> Se desarrolla un lenguaje nuevo, vasto y poderoso para el uso futuro del análisis, en el que esgrimir sus verdades para que puedan tener una aplicación práctica más rápida y precisa para el propósitos de la humanidad.
>
> **Ada Lovelace**
> **informático británico**



Calculo diferencialexamina la tasa de cambio a lo largo del tiempo, que aquí se muestra geométricamente como la tasa de cambio de una curva. El cálculo integral examina las áreas, volúmenes o desplazamientos delimitados por curvas.

estableció las primeras reglas para el uso de números complejos e imaginarios, tuvieron que pasar 200 años más hasta que el matemático suizo Leonhard Euler introdujo el símbolo$i$para denotar la unidad imaginaria.

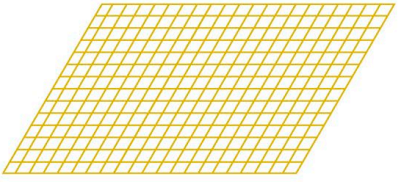
Al igual que los números negativos, los números complejos encontraron resistencia hasta el siglo XVIII. Sin embargo, representaron un avance significativo en matemáticas. No sólo permiten la solución de ecuaciones cúbicas sino que, a diferencia de los números reales, pueden usarse para resolver todas las ecuaciones polinómicas de orden superior (aquellas que involucran dos o más términos sumados y potencias superiores de una variable).x, comox^4ox^5). Los números complejos surgen de forma natural en muchas ramas de la física, como la mecánica cuántica y el electromagnetismo.

Cálculo infinitesimal

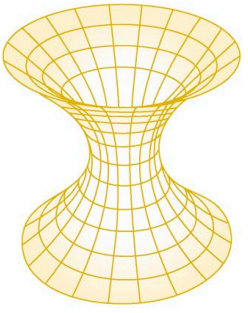
Del siglo XIV al XVII, junto con el creciente uso de símbolos, muchos Surgieron nuevos métodos y técnicas. Uno de los más significativos para la física fue el desarrollo de métodos "infinitesimales" para estudiar curvas y cambios. El antiguo método griego de agotamiento (encontrar el área de una forma llenándola con polígonos más pequeños) se perfeccionó para calcular áreas delimitadas por curvas. Finalmente evolucionó hasta convertirse en una rama de las matemáticas llamada cálculo integral. En el siglo XVII, el estudio de las tangentes a curvas del abogado francés Pierre de Fermat inspiró el desarrollo del cálculo diferencial: el cálculo de tasas de cambio.

Alrededor de 1670, el físico inglés Isaac Newton y el filósofo alemán Gottfried Leibniz elaboraron de forma independiente una teoría que unía el cálculo integral y diferencial en el cálculo infinitesimal. La idea subyacente es aproximar una curva (una cantidad cambiante) mediante-

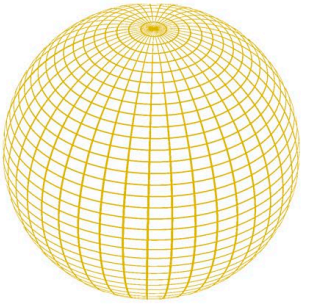
Geometrías euclidianas y no euclidianas



En geometría euclidiana, se supone que el espacio es "plano". Las líneas paralelas permanecen a una distancia constante una de otra y nunca se encuentran.



En geometría hiperbólica, desarrollado por Bolyai y Lobachevsky, la superficie se curva como una silla de montar y las líneas en la superficie se alejan unas de otras.



En geometría elíptica, la superficie se curva hacia afuera como una esfera y las líneas paralelas se curvan entre sí y finalmente se cruzan.

considerando que está formado por muchas líneas rectas (una serie de cantidades fijas diferentes). En el límite teórico, la curva es idéntica a un número infinito de aproximaciones infinitesimales.

Durante los siglos XVIII y XIX, las aplicaciones del cálculo en física se dispararon. Los físicos ahora podían modelar con precisión sistemas dinámicos (cambiantes), desde cuerdas vibrantes hasta la difusión de calor. El trabajo del físico escocés del siglo XIX James Clerk Maxwell influyó enormemente en el desarrollo del cálculo vectorial, que modela cambios en fenómenos que tienen tanto cantidad como dirección. Maxwell también fue pionero en el uso de técnicas estadísticas para el estudio de grandes cantidades de partículas.

Geometrías no euclidianas

El quinto axioma, o postulado, sobre geometría que Euclides expuso en su *Elementos*, también se conoce como postulado de las paralelas. Esto fue controvertido, incluso en la antigüedad, ya que parece menos evidente que los demás, aunque muchos teoremas dependen de ello. Afirma que, dada una recta y un punto que no está en esa línea, se puede trazar exactamente una línea que pase por el punto dado y sea paralela a la línea dada. A lo largo de la historia, varios matemáticos, como Proclo de Atenas en el siglo V o el matemático árabe al-Haytham, han intentado en vano demostrar que el postulado de las paralelas puede derivarse de los demás postulados. A principios del siglo XIX, el matemático húngaro János Bolyai y el matemático ruso Nicolai Lobachevsky, de forma independiente,

desarrolló una versión de la geometría

> De la nada he creado un universo nuevo y extraño. Todo lo que te he enviado anteriormente es como un castillo de naipes en comparación con una torre.
>
> **János Bolyai**
> **en una carta a su padre**

(geometría hiperbólica) en la que el quinto postulado es falso y las líneas paralelas nunca se encuentran. En su geometría, la superficie no es plana como en la de Euclides, sino que se curva hacia dentro. Por el contrario, en la geometría elíptica y la geometría esférica, también descritas en el siglo XIX, no hay líneas paralelas; todas las líneas se cruzan.

matemático alemán Bernhard Riemann y otros formalizaron estas geometrías no euclidianas. Einstein utilizó la teoría de Riemann en su teoría general de la relatividad, la explicación más avanzada de la gravedad en la que la masa “dobla” el espacio-tiempo, haciéndolo no euclidiano, aunque el espacio sigue siendo homogéneo (uniforme, con las mismas propiedades en todos los puntos).

Álgebra abstracta

En el siglo XIX, el álgebra había experimentado un cambio sísmico hasta convertirse en un estudio de simetría abstracta. El matemático francés Évariste Galois fue responsable de un avance clave. En 1830, mientras investigaba ciertas simetrías exhibidas por las raíces (soluciones) de ecuaciones polinomiales,

Desarrolló una teoría de objetos matemáticos abstractos, llamados grupos, para codificar diferentes tipos de simetrías. Por ejemplo, todos los cuadrados exhiben las mismas características de reflexión y rotación.
simetrías, y por lo tanto están asociados con un grupo particular. A partir de su investigación, Galois determinó que, a diferencia de las ecuaciones cuadráticas (con una variable elevada a dos, comoX_2, pero no superior), no existe una fórmula general para resolver ecuaciones polinómicas de grado cinco (con términos comoX_5) o mas alto. Este fue un resultado dramático; había demostrado que no podía existir tal fórmula, sin importar los desarrollos futuros que se produjeran en las matemáticas.

Posteriormente, el álgebra creció hasta convertirse en el estudio abstracto de grupos y objetos similares, y las simetrías que codificaban. En el siglo XX, los grupos y la simetría resultaron vitales para describir los fenómenos naturales al nivel más profundo. En 1915,
La algebraista alemana Emmy Noether relacionó la simetría en las ecuaciones con las leyes de conservación, como la conservación de la energía, en física.

En las décadas de 1950 y 1960, los físicos utilizaron la teoría de grupos para desarrollar el modelo estándar de la física de partículas.

Modelando la realidad

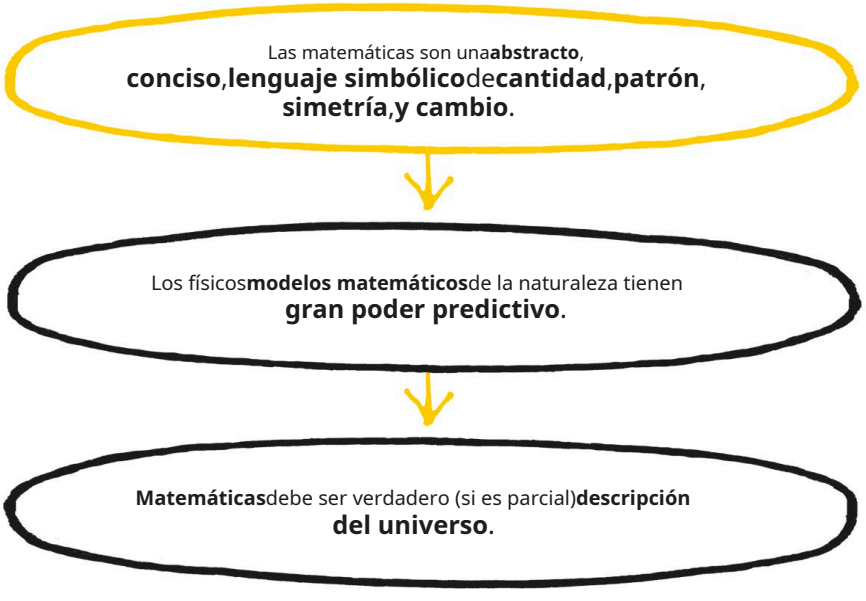
Las matemáticas son el estudio abstracto de números, cantidades y formas, que la física emplea para modelar la realidad, expresar teorías y predecir resultados futuros, a menudo con una precisión asombrosa. Por ejemplo, el factor g del electrón, una medida de su comportamiento en un campo electromagnético, se calcula como 2,002 319 304 361 6, mientras que el valor determinado experimentalmente es 2,002 319 304 362 5 (con una diferencia de sólo una parte en un billón).

Ciertos modelos matemáticos han perdurado durante siglos y sólo han requerido ajustes menores. Por ejemplo, el modelo del sistema solar de 1619 del astrónomo alemán Johannes Kepler, con algunos refinamientos de Newton y Einstein, sigue siendo válido en la actualidad. Los físicos han aplicado ideas que los matemáticos desarrollaron, a veces mucho antes, simplemente para investigar un patrón; para

emmy noether Fue un algebraista muy creativo. Enseñó en la Universidad de Göttingen en Alemania, pero como judía se vio obligada a abandonarla en 1933. Murió en Estados Unidos en 1935, a los 53 años.

Por ejemplo, la aplicación de la teoría de grupos del siglo XIX a la física cuántica moderna. También hay muchos ejemplos de estructuras matemáticas que permiten conocer la naturaleza. Cuando el físico británico Paul Dirac encontró el doble de expresiones de lo esperado en sus ecuaciones que describen el comportamiento de los electrones, consistentes con la relatividad y la cuántica.
mecánica, postuló la existencia de un antielectrón; fue debidamente descubierto, años después.

Mientras los físicos investigan qué "hay" en el universo, los matemáticos están divididos en cuanto a si su estudio trata sobre la naturaleza, la mente humana o la manipulación abstracta de símbolos. en un
En un extraño giro histórico, los físicos que investigan la teoría de cuerdas ahora sugieren avances revolucionarios en matemáticas puras a los geómetras (matemáticos que estudian geometría). Aún está por verse exactamente cómo esto ilumina la relación entre matemáticas, física y "realidad".-



LOS CUERPOS SUFREN SIN RESISTENCIA

PERO DE DONDE EL AIRE

CAÍDA LIBRE

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Galileo Galilei(1564-1642)

ANTES
C. 350antes de Cristo En *Física*, Aristóteles explica la gravedad como una fuerza que mueve los cuerpos hacia su "lugar natural", hacia el centro de la Tierra.

1576 Giuseppe Moletti
Escribe que objetos de diferentes pesos caen libremente al mismo ritmo.

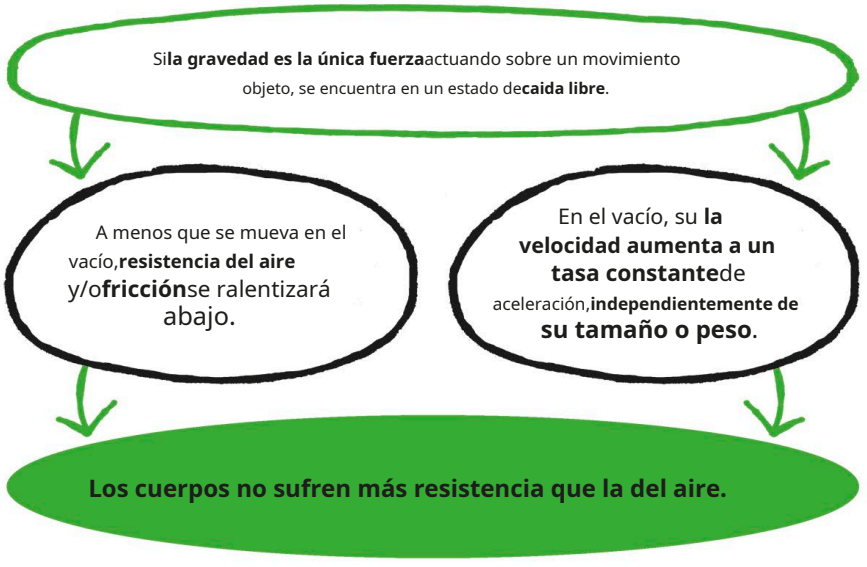
DESPUÉS
1651 Giovanni Riccioli y Francesco Grimaldi miden el tiempo de descenso de los cuerpos que caen, lo que permite calcular su tasa de aceleración.

1687 En *Principios*, expone Isaac Newton
Teoría gravitacional en detalle.

1971 David Scott muestra que un martillo y una pluma caen a la misma velocidad en la luna.

Cuando la gravedad es la única fuerza que actúa sobre un objeto en movimiento, se dice que es en "caída libre". Un paracaidista que cae desde un avión no está en caída libre, ya que la resistencia del aire actúa sobre él, mientras que los planetas que orbitan alrededor del sol o de otra estrella sí lo están. El antiguo filósofo griego Aristóteles creía que el movimiento descendente de los objetos lanzados desde una altura se debía a su naturaleza: se movían hacia el centro de la Tierra, su lugar natural. Desde la época de Aristóteles hasta la Edad Media, se aceptó como un hecho que la velocidad de un objeto en caída libre era proporcional a su peso, e inversamente proporcional a la densidad.

Ver también: Distancia de medición 18–19 · Tiempo de medición 38–39 Leyes del movimiento 40–45 · Leyes de la gravedad 46–51 Energía cinética y energía potencial 54



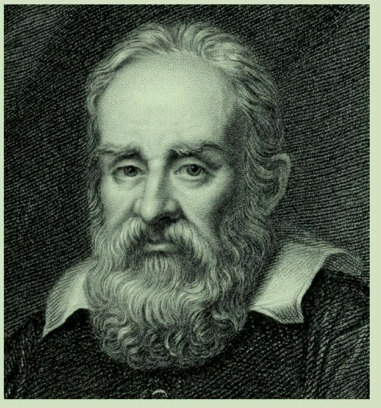
del medio por el que estaba cayendo. Entonces, si se dejan caer dos objetos de diferentes pesos al mismo tiempo, el más pesado caerá más rápido y llegará al suelo antes que el objeto más liviano. Aristóteles también entendió que la forma y la orientación del objeto eran factores que influyeban en la rapidez con la que caía, por lo que un trozo de papel desdoblado caería más lentamente que el mismo trozo de papel enrollado formando una bola.

esferas que caen

En algún momento entre 1589 y 1592, según su alumno y biógrafo Vincenzo Viviani, el erudito italiano Galileo Galilei dejó caer dos esferas de diferente peso desde la Torre de Pisa para probar la teoría de Aristóteles. Aunque era más probable que hubiera sido un experimento mental que un evento de la vida real, Galileo se emocionó al descubrir que la esfera más ligera cayó al suelo tan rápido como la más pesada. Esto contradecía la visión aristotélica de que un peso más pesado Un cuerpo en caída libre caerá más rápidamente que uno más ligero, una opinión que recientemente había sido cuestionada por varios otros científicos.

En 1576, Giuseppe Moletti, predecesor de Galileo en la cátedra de Matemáticas de la Universidad de Padua, había escrito que objetos de diferente peso pero hechos del mismo material caían al suelo a la misma velocidad. También creía que los cuerpos del mismo volumen--

> La naturaleza es inexorable y inmutable; Ella nunca transgrede las leyes impuesto a ella.
> **Galileo Galilei**

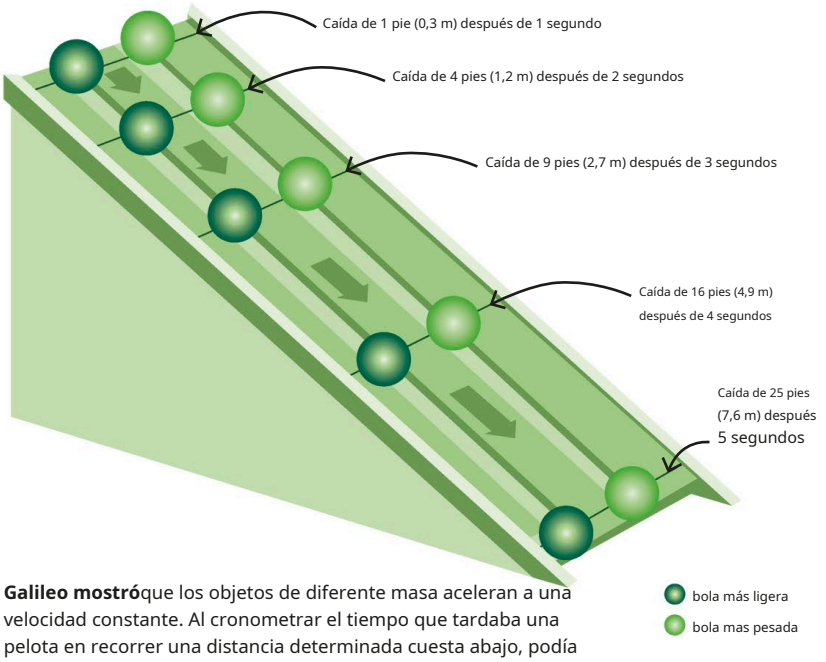


Galileo Galilei

Galileo, el mayor de seis hermanos, nació en Pisa, Italia, en 1564. Se matriculó para estudiar medicina en la Universidad de Pisa a la edad de 16 años, pero sus intereses se ampliaron rápidamente y fue nombrado catedrático de Matemáticas en la Universidad de Padua. en 1592. Las contribuciones de Galileo a la física,
Las matemáticas, la astronomía y la ingeniería lo destacan como una de las figuras clave de la Revolución Científica en la Europa de los siglos XVI y XVII. Creó el primer termoscopio (uno de los primeros termómetros),
Defendió la idea copernicana de un sistema solar heliocéntrico e hizo importantes descubrimientos sobre la gravedad. Debido a que algunas de sus ideas desafiaban el dogma de la Iglesia, fue llamado ante la Inquisición Romana en 1633, declarado hereje y sentenciado a arresto domiciliario hasta su muerte en 1642.

Trabajos clave

1623 *El ensayador*
1632 *Diálogo sobre los dos principales sistemas mundiales*
1638 *Discursos y Demostraciones matemáticas relacionadas con dos nuevas ciencias*



Galileo mostróque los objetos de diferente masa aceleran a una velocidad constante. Al cronometrar el tiempo que tardaba una pelota en recorrer una distancia determinada cuesta abajo, podía calcular su aceleración. La distancia caída siempre fue proporcional al cuadrado del tiempo necesario para caer.

pero hechos de diferentes materiales cayeron al mismo ritmo. Diez años más tarde, los científicos holandeses Simon Stevin y Jan Cornets de Groot subieron 10 m (33 pies) a la torre de una iglesia en Delft para liberar dos bolas de plomo, una diez veces más grande y pesada que la otra. Los vieron caer al suelo al mismo tiempo. La antigua idea de que los objetos más pesados caen más rápido que los más ligeros se fue desacreditando gradualmente.

Otra de las creencias de Aristóteles, según la cual un objeto en caída libre desciende a una velocidad constante, había sido cuestionada aún antes. Hacia 1361, la matemática francesa Nicole Oresme había estudiado el movimiento de los cuerpos. Descubrió que si la aceleración de un objeto aumenta uniformemente, su velocidad aumenta en proporción directa al tiempo, y la distancia que recorre es proporcional al cuadrado del tiempo durante el cual acelera. Quizás fue sorprendente que Oresme hubiera desafiado la "verdad" aristotélica establecida, que en ese momento se consideraba sacrosanto por la Iglesia Católica, en la que Oresme sirvió como obispo. No se sabe si los estudios de Oresme influyeron en los trabajos posteriores de Galileo.

Bolas en rampas

A partir de 1603, Galileo se propuso investigar la aceleración de los objetos en caída libre. No convencido de que cayeran a una velocidad constante, creía que aceleraban al caer, pero el problema era cómo demostrarlo. La tecnología para registrar con precisión tales velocidades simplemente no existía. La ingeniosa solución de Galileo fue reducir el movimiento a una velocidad mensurable, reemplazando un objeto que caía por una bola que rodaba por una rampa inclinada. Cronometró el experimento utilizando un reloj de agua (un dispositivo que pesaba el agua que chorreaba en una urna a medida que viajaba la bola) y su propio pulso. Si duplicó el período de tiempo que la pelota rodó, encontró que la distancia que recorrió fue cuatro veces mayor.

Sin dejar nada al azar, Galileo repitió el experimento "cien veces" hasta lograr "una precisión tal que la desviación entre dos observaciones nunca excedió uno-

en este frescode Giuseppe Bezzuoli, se muestra a Galileo demostrando su experimento de la bola rodante en presencia de la poderosa familia Medici en Florencia.

décima parte del latido del pulso". También cambió la inclinación de la rampa: a medida que se hacía más pronunciada, la aceleración aumentaba uniformemente. Como los experimentos de Galileo no se llevaron a cabo en el vacío, fueron imperfectos: las bolas en movimiento estaban sujetas a la resistencia del aire y a la fricción de la rampa. Sin embargo, Galileo concluyó que en el vacío, todos los objetos, independientemente de su peso o forma, se acelerarían a un ritmo uniforme: el cuadrado del tiempo transcurrido de la caída es proporcional a la distancia caída.

Cuantificando la aceleración gravitacional

A pesar del trabajo de Galileo, la cuestión de la aceleración de los objetos en caída libre todavía era polémica a mediados del siglo XVII. De 1640 a 1650, los sacerdotes jesuitas Giovanni Riccioli y Francesco Grimaldi llevaron a cabo diversas investigaciones en Bolonia. La clave de su éxito final fueron los péndulos de cronometraje de Riccioli, que eran tan precisos como cualquiera disponible en ese momento, y una torre muy alta. Los dos sacerdotes y sus asistentes dejaron caer objetos pesados desde varios niveles de la Torre Asinelli de 321 pies (98 m), cronometrando sus descensos.

> Cuando Galileo causó bolas... para rodar hacia abajo un plano inclinado, una luz brilló sobre todos estudiantes de la naturaleza.
>
> **Immanuel Kant**
> **filósofo alemán**

El martillo y la pluma

En 1971, el astronauta estadounidense David Scott, comandante de la misión lunar Apolo 15, realizó un famoso experimento de caída libre. La cuarta expedición de la NASA que aterrizó en la luna, el Apolo 15, fue capaz de permanecer en la luna más tiempo que las expediciones anteriores, y su tripulación fue la primera en utilizar un vehículo itinerante lunar.

El Apolo 15 también se centró más en la ciencia que los alunizajes anteriores. Al final de la última misión lunar

Mientras caminaba, Scott dejó caer un martillo geológico de 3 libras y una pluma de halcón de 1 oz desde una altura de 5 pies. En las condiciones de vacío virtual de la superficie de la luna, sin resistencia del aire, la pluma ultraligera cayó al suelo a la misma velocidad. como el pesado martillo. El experimento fue filmado, por lo que esta confirmación de la teoría de Galileo de que todos

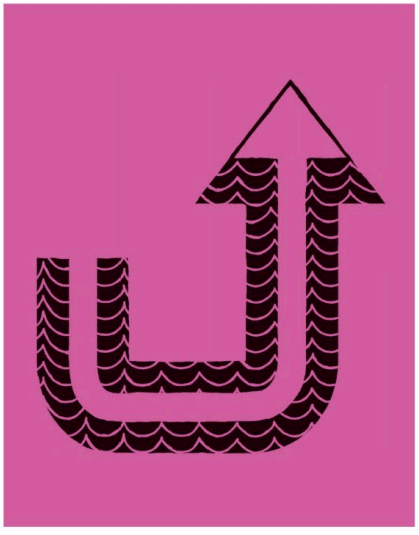
Los objetos se aceleran a un ritmo uniforme independientemente de su masa fue presenciado por una audiencia televisiva de millones de personas.

Los sacerdotes, que describieron detalladamente su metodología, repitieron los experimentos varias veces.

Riccioli creía que los objetos en caída libre se aceleraban exponencialmente, pero los resultados le demostraron que estaba equivocado. Una serie de objetos que caían fueron cronometrados mediante péndulos en la parte superior e inferior de la torre. Cayeron 15 pies romanos (1 pie romano = 11,6 pulgadas) en 1 segundo, 60 pies en 2 segundos, 135 pies en 3 segundos y 240 pies en 4 segundos. Los datos, publicados en 1651, demostraron que la distancia de descenso era proporcional al cuadrado del tiempo que el objeto estuvo cayendo, lo que confirma los experimentos de rampa de Galileo. Y por primera vez, gracias a un cronometraje relativamente preciso, fue posible calcular el valor de la aceleración de la gravedad: 9,36 (±0,22) m/s$_2$. Esta cifra es sólo alrededor de un 5 por ciento menor que el rango de cifras aceptadas hoy en día: alrededor de 9,81 m/s.$_2$.

El valor de gramo (gravedad) varía según una serie de factores: es mayor en los polos de la Tierra que en el ecuador, menor en altitudes elevadas que en el nivel del mar, y varía muy ligeramente según la geología local, por ejemplo si hay zonas especialmente rocas densas cerca de la superficie de la Tierra. Si la aceleración constante de un objeto en caída libre cerca de la superficie de la Tierra está representada por gramo , la altura a la que se suelta es z_0 y el tiempo es t, luego, en cualquier etapa de su descenso, la altura del cuerpo sobre la superficie $z = z_0 - 1/2 gt^2$, dónde gt es la velocidad del cuerpo y gramo su aceleración. Un cuerpo de masa metro en una altura z_0 sobre la superficie de la Tierra posee energía potencial gravitacional Ud., que se puede calcular mediante la ecuación $Ud. = mgz$ (masa - aceleración - altura sobre la superficie de la Tierra).

> En cuestiones de ciencia, la autoridad de mil no vale el humilde razonamiento de un solo individuo.
>
> **Galileo Galilei**



UNA NUEVA MÁQUINA PARA MULTIPLICAR EFECTIVO

PRESIÓN

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Blaise Pascal(1623-1662)

ANTES
1643físico italiano Evangelista Torricelli demuestra la existencia de un vacío utilizando mercurio en un tubo; Este principio se utilizó más tarde para inventar el barómetro.

DESPUÉS
1738 En *hidrodinámica*, el matemático suizo Daniel Bernoulli sostiene que la energía en un fluido se debe a la elevación, el movimiento y la presión.

1796 José Bramah, un inventor británico, utiliza la ley de Pascal para patentar la primera prensa hidráulica.

1851escocés-americano El inventor Richard Dudgeon patenta un gato hidráulico.

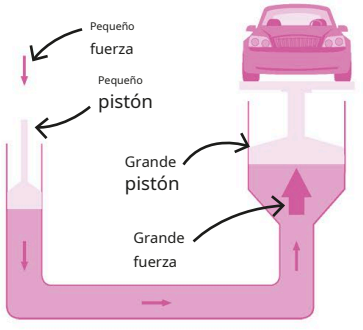
1906 Se instala un sistema oleohidráulico para subir y bajar los cañones del buque de guerra estadounidense. *Virginia*.

Mientras investigaba hidráulica (la propiedades mecánicas de líquidos), el matemático y físico francés Blaise Pascal hizo un descubrimiento que eventualmente revolucionaría muchos procesos industriales. La ley de Pascal, como se conoció, establece que si se aplica presión a cualquier parte de un líquido en un espacio cerrado, esa presión se transmite por igual a todas las partes del fluido y a las paredes del recipiente.

El impacto de Pascal

La ley de Pascal significa que la presión ejercida sobre un pistón en un extremo de un cilindro lleno de líquido produce un aumento igual de presión sobre otro pistón en el otro extremo del cilindro. Más importante aún, si la sección transversal del segundo pistón es el doble que la del primero, la fuerza sobre él será el doble. Entonces, una carga de 1 kg (2,2 lb) sobre el pistón pequeño permitirá que el pistón grande levante 2 kg (4,4 lb); cuanto mayor sea la relación de las secciones transversales, más peso podrá levantar el pistón grande.

Los hallazgos de Pascal no se publicaron hasta 1663, un año después de su muerte, pero serían utilizados por los ingenieros para facilitar mucho el funcionamiento de la maquinaria. En 1796, Joseph Bramah aplicó el principio para construir una prensa hidráulica que aplanaba papel, tela y acero, de manera más eficiente y poderosa que las prensas de madera anteriores.



Los líquidos no se pueden comprimir. y se utilizan para transmitir fuerzas en sistemas hidráulicos como gatos para automóviles. Una pequeña fuerza aplicada a lo largo de una larga distancia se convierte en una fuerza mayor a lo largo de una pequeña distancia, lo que puede levantar una carga pesada.

Ver también: Leyes del movimiento 40–45 · Estirar y apretar 72–75 · fluidos 76–79 Las leyes de los gases 82–85

MOVIMIENTO VOLUNTAD

PERSISTIR

IMPULSO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Juan Wallis(1616-1703)

ANTES
1518francés natural El filósofo Jean Buridan describe el "impulso", cuya medida más tarde se entenderá como impulso.

1644 En su*Principios filosóficos*(*Principios de Filosofía*), el científico francés René Descartes describe el impulso como la "cantidad de movimiento".

DESPUÉS
1687 Isaac Newton describe sus leyes del movimiento en su obra de tres volúmenes*Principios*.

1927 El físico teórico alemán Werner Heisenberg sostiene que para una partícula subatómica, como un electrón, cuanto más precisamente se conoce su posición, con menos precisión se puede conocer su momento, y viceversa.

Cuando los objetos chocan, pasan varias cosas. Cambian de velocidad y dirección, y la energía cinética del movimiento puede convertirse en calor o sonido.

En 1666, la Royal Society de Londres desafió a los científicos a idear una teoría que explicara lo que sucede cuando los objetos chocan. Dos años más tarde, tres personas publicaron sus teorías: desde Inglaterra, John Wallis y Christopher Wren, y de Holanda, Christiaan Huygens.

Todos los cuerpos en movimiento tienen impulso (el producto de su masa y velocidad). Los cuerpos estacionarios no tienen impulso porque su velocidad es cero. Wallis, Wren y Huygens coincidieron en que en una colisión elástica (cualquier colisión en la que no se pierde energía cinética mediante la creación de calor o ruido), el impulso se conserva mientras no haya otras fuerzas externas en acción.

Verdaderamente elástico

las colisiones son raras por naturaleza; el empujón de una bola de billar por otra se acerca, pero hay

> Un cuerpo en movimiento tiende a continuar su movimiento.
>
> **Juan Wallis**

Todavía hay cierta pérdida de energía cinética. En *El tratamiento geométrico de la mecánica del movimiento.*, John Wallis fue más allá y argumentó correctamente que el impulso también se conserva en las colisiones inelásticas, donde los objetos se adhieren después de chocar, provocando la pérdida de energía cinética. Un ejemplo de ello es el de un cometa que choca contra un planeta.

Hoy en día, los principios de conservación del impulso tienen muchas aplicaciones prácticas, como la determinación de la velocidad de los vehículos tras accidentes de tráfico.

Ver también: Leyes del movimiento 40–45 · Energía cinética y energía potencial 54 · La conservación de la energía 55. Energía y movimiento 56–57

EL MAS MARAVILLOSO PRODUCCIONES DEL ARTES MECANICAS

MIDIENDO EL TIEMPO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Christian Huygens
(1629-1695)

ANTES

C. 1275 Se construye el primer reloj totalmente mecánico.

1505relojero alemán
Peter Henlein utiliza la fuerza de un resorte que se desenrosca para fabricar el primer reloj de bolsillo.

1637 Galileo Galilei tiene la idea de un reloj de péndulo.

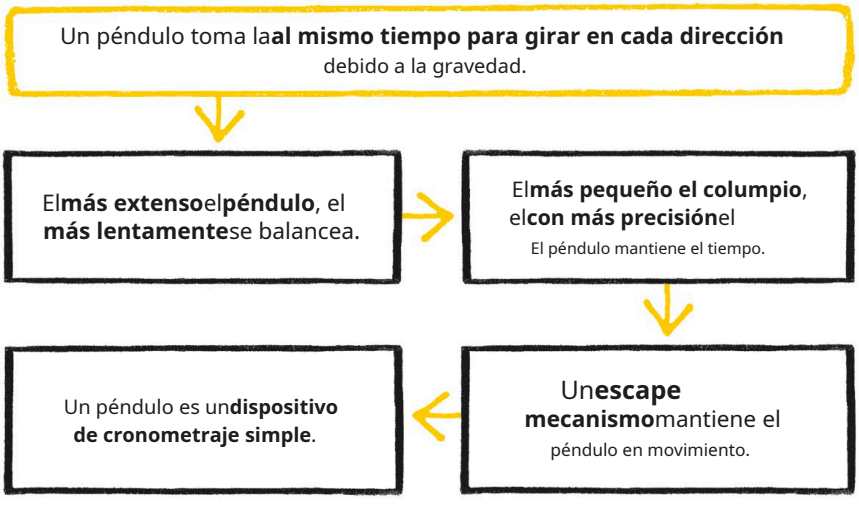
DESPUÉS

C. 1670 El mecanismo de escape del ancla.
Hace que el reloj de péndulo sea más preciso.

1761 El cuarto cronómetro marino de John Harrison, el H4, supera sus pruebas en el mar.

1927 Se construye el primer reloj electrónico, con cristal de cuarzo.

1955 Los físicos británicos Louis Essen y Jack Parry construyen el primer reloj atómico.

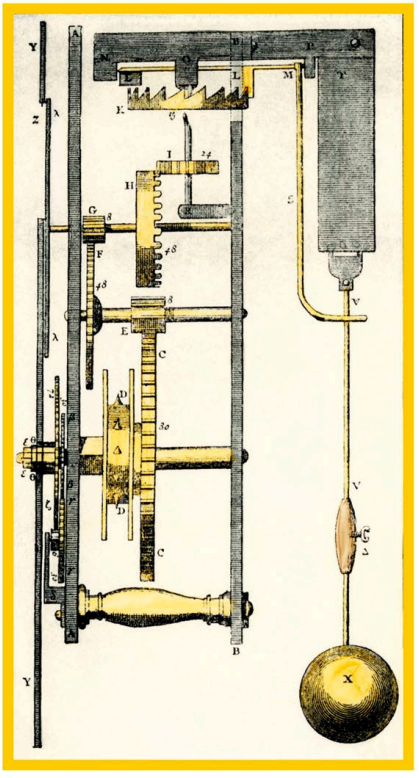


Tres inventos a mediados de la década de 1650 anunciaron el inicio de la era del cronometraje de precisión. En 1656, el matemático, físico e inventor holandés Christiaan Huygens construyó el primer reloj de péndulo. Poco después, el científico inglés Robert Hooke inventó el escape del ancla. En la década de 1670, la precisión de los dispositivos de cronometraje había cambiado.

Los primeros relojes enteramente mecánicos aparecieron en Europa en el siglo XIII, reemplazando a los relojes que dependían del movimiento del sol. el fluir del agua o el encendido de una vela. Estos relojes mecánicos dependían de un "mecanismo de escape de borde", que transmitía la fuerza de un peso suspendido a través del tren de engranajes del reloj, una serie de ruedas dentadas. Durante los siguientes tres siglos, hubo avances graduales en la precisión de estos relojes, pero había que darles cuerda con regularidad y todavía no eran muy precisos.

En 1637, Galileo Galilei se dio cuenta del potencial de los péndulos para proporcionar relojes más precisos. el encontro que

Ver también: Caída libre 32–35 · Movimiento armónico 52–53 · unidades SI y fisicas constantes 58–63 · Partículas subatómicas 242–243



Christian Huygens El reloj de péndulo mejoró drásticamente la precisión de los dispositivos de cronometraje. Este grabado en madera del siglo XVII muestra el funcionamiento interno de su reloj, incluidos los engranajes dentados y el péndulo.

un péndulo oscilante era casi isócrono, lo que significa que el tiempo que tardaba la pesa en su extremo en regresar a su punto inicial (su período) era aproximadamente el mismo independientemente de la duración de su oscilación. La oscilación de un péndulo podría producir una forma más precisa de mantener el tiempo que los relojes mecánicos existentes. Sin embargo, no había logrado construirlo antes de su muerte en 1642.

El primer reloj de péndulo de Huygens tenía una oscilación de 80 a 100 grados, demasiado grande para una precisión total. La introducción del escape de ancla de Hooke, que mantenía la oscilación del péndulo dándole un pequeño empujón en cada oscilación, permitió el uso de un péndulo más largo con una oscilación menor de sólo 4 a 6 grados, lo que proporcionó una precisión mucho mayor. Antes

Esto hizo que incluso los relojes no pendulares más avanzados perdieran 15 minutos al día; ahora ese margen de error podría reducirse a tan sólo 15 segundos.

Relojes de cuarzo y atómicos.

Los relojes de péndulo siguieron siendo la forma más precisa de medir el tiempo hasta la década de 1930, cuando estuvieron disponibles los relojes eléctricos sincrónicos. Estos contaban las oscilaciones de la corriente alterna procedente del suministro de energía eléctrica; un cierto número de oscilaciones se traducían en movimientos de las manecillas del reloj.

El primer reloj de cuarzo se construyó en 1927, aprovechando la cualidad piezoeléctrica del cuarzo cristalino. Cuando se dobla o se aprieta, genera un voltaje eléctrico diminuto, o por el contrario, si se somete a un voltaje eléctrico, vibra. Una batería dentro del reloj emite voltaje y el chip de cuarzo vibra, lo que hace que una pantalla LCD cambie o que un pequeño motor mueva las manecillas de segundos, minutos y horas.

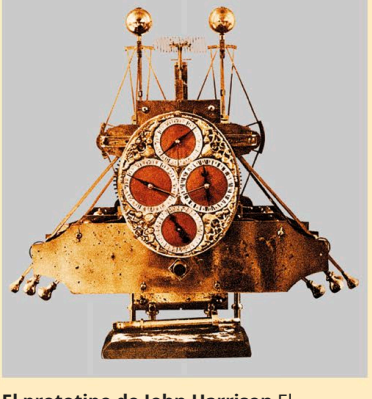
El primer reloj atómico preciso, construido en 1955, utilizó el isótopo de cesio-133. Los relojes atómicos miden la frecuencia de las señales electromagnéticas regulares que emiten los electrones cuando cambian entre dos niveles de energía diferentes cuando son bombardeados con microondas. Los electrones de un átomo de cesio "excitado" oscilan o vibran 9.192.631.770 veces por segundo, lo que hace que un reloj calibrado sobre la base de estas oscilaciones sea extremadamente preciso.

marina de harrison cronómetro

A principios del siglo XVIII, ni siquiera los relojes de péndulo más precisos funcionaban en el mar, lo que suponía un problema importante para la navegación náutica. Sin puntos de referencia visibles, el cálculo de la posición de un barco dependía de la latitud y longitud precisas.

lecturas. Si bien era fácil medir la latitud (observando la posición del sol), la longitud sólo podía determinarse conociendo la hora relativa a un punto fijo, como el meridiano de Greenwich. Sin relojes que funcionaran en el mar, esto era imposible. Los barcos se perdieron y muchos hombres murieron, por lo que, en 1714, el gobierno británico ofreció un premio para fomentar la invención de un reloj marino.

El inventor británico Juan. Harrison resolvió el problema en 1761. Su cronómetro marino utilizaba un volante de giro rápido y un resorte en espiral con temperatura compensada para lograr una medición del tiempo notablemente precisa en viajes transatlánticos. El dispositivo salvó vidas y revolucionó exploración y comercio.

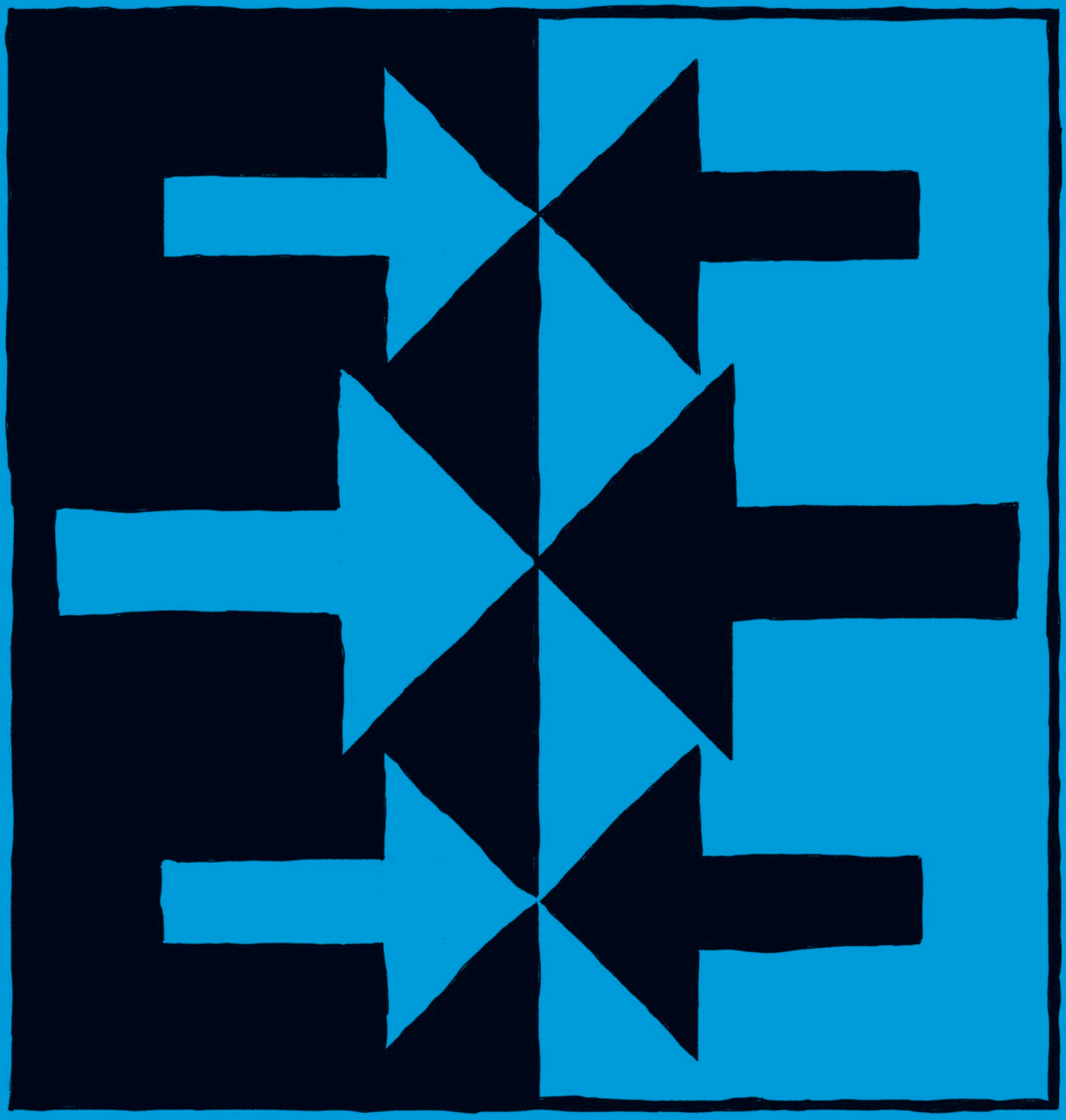


El prototipo de John Harrison El cronómetro H1 realizó pruebas en el mar desde Gran Bretaña hasta Portugal en 1736, perdiendo sólo unos segundos en todo el viaje.

TODA ACCIÓN TIENE UN

REACCIÓN

LEYES DEL MOVIMIENTO



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES

Gottfried Leibniz(1646-1716), **isaac newton**(1642-1727)

ANTES

C. 330antes de Cristo En*Física*, Aristóteles expone su teoría de que se necesita fuerza para producir movimiento.

1638 Galileo*Diálogos sobre dos nuevos Ciencias*Esta publicado. Más tarde, Albert Einstein lo describe como una anticipación del trabajo de Leibniz y Newton.

1644 René Descartes publica*Principios de Filosofía*, que incluye leyes del movimiento.

DESPUÉS

1827-1833 William Rowan Hamilton establece que los objetos tienden a moverse por el camino que requiere menor energía.

1907-1915 Einstein propone su teoría de la relatividad general.

PAG

Antes de finales del siglo XVI había poca comprensión de por qué los cuerpos en movimiento se aceleraban o desaceleraban; la mayoría de la gente creía que alguna cualidad indeterminada e innata hacía que los objetos cayeran al suelo o flotaran hacia el cielo. Pero esto cambió en los albores de la Revolución Científica, cuando los científicos comenzaron a comprender que varias fuerzas son responsables de cambiar la velocidad de un objeto en movimiento (una medida combinada de su velocidad y dirección), incluyendo la fricción, la resistencia del aire y la gravedad.

Vistas tempranas

Durante muchos siglos, las ideas generalmente aceptadas sobre el movimiento fueron las de los antiguos griegos. filósofo Aristóteles, quien clasificó todo lo que hay en el mundo según su composición elemental: tierra, agua, aire, fuego y quintaesencia, un quinto elemento que constituía los "cielos".

Para Aristóteles, una roca cae al suelo porque tiene una composición similar a la del suelo ("tierra"). La lluvia cae al suelo porque el lugar natural del agua está en la superficie de la Tierra. superficie. El humo se eleva porque está compuesto en gran parte de aire. Sin embargo, no se consideraba que el movimiento circular de los objetos celestes estuviera gobernado por los elementos; más bien, se pensaba que estaban guiados por la mano de una deidad.

Aristóteles creía que los cuerpos se mueven sólo si son empujados, y una vez que cesa la fuerza de empuje, se detienen. Algunos se preguntaron por qué una flecha disparada desde un arco continúa volando por el aire mucho después de que ha cesado el contacto directo con el arco, pero las opiniones de Aristóteles no fueron cuestionadas durante más de dos milenios.

En 1543, el astrónomo polaco Nicolás Copérnico publicó su teoría de que la Tierra no era el centro del universo, sino que ella y los demás planetas orbitaban alrededor del sol en un sistema "heliocéntrico". Entre 1609 y 1619, el astrónomo alemán Johannes Kepler desarrolló sus leyes del movimiento planetario, que describen la forma y velocidad de las órbitas de los planetas. Luego, en la década de 1630, Galileo cuestionó las opiniones de Aristóteles sobre la caída de objetos, explicó que una flecha suelta sigue volando

Gottfried Leibniz

Nacido en Leipzig (actualmente Alemania) en 1646, Leibniz fue un gran filósofo, matemático y físico. Después de estudiar filosofía en la Universidad de Leipzig, conoció a Christiaan Huygens en París y decidió aprender matemáticas y física por su cuenta. Se convirtió en asesor político, historiador y bibliotecario de la Casa real de Brunswick en Hannover en 1676, cargo que le brindó la oportunidad de trabajar en una amplia gama de proyectos, incluido el desarrollo del cálculo infinitesimal. Sin embargo, también fue acusado de haber visto la obra de Newton. ideas inéditas y hacerlas pasar como propias. Aunque más tarde se aceptó generalmente que Leibniz había llegado a sus ideas de forma independiente, nunca logró librarse del escándalo durante su vida. Murió en Hannover en 1716.

Trabajos clave

1684"Nova Methodus pro maximis et minimis" ("Nuevo método para máximos y mínimos")

1687*Ensayo sobre dinámica*

Ver también: Caída libre 32–35 · Leyes de la gravedad 46–51 · Energía cinética y energía potencial 54 · Energía y movimiento 56–57 · Los cielos 270–271 · Modelos del universo 272–273 · De la relatividad clásica a la relatividad especial 274

> No hay ni más ni menos poder en un efecto que hay en su causa.
> **Gottfried Leibniz**

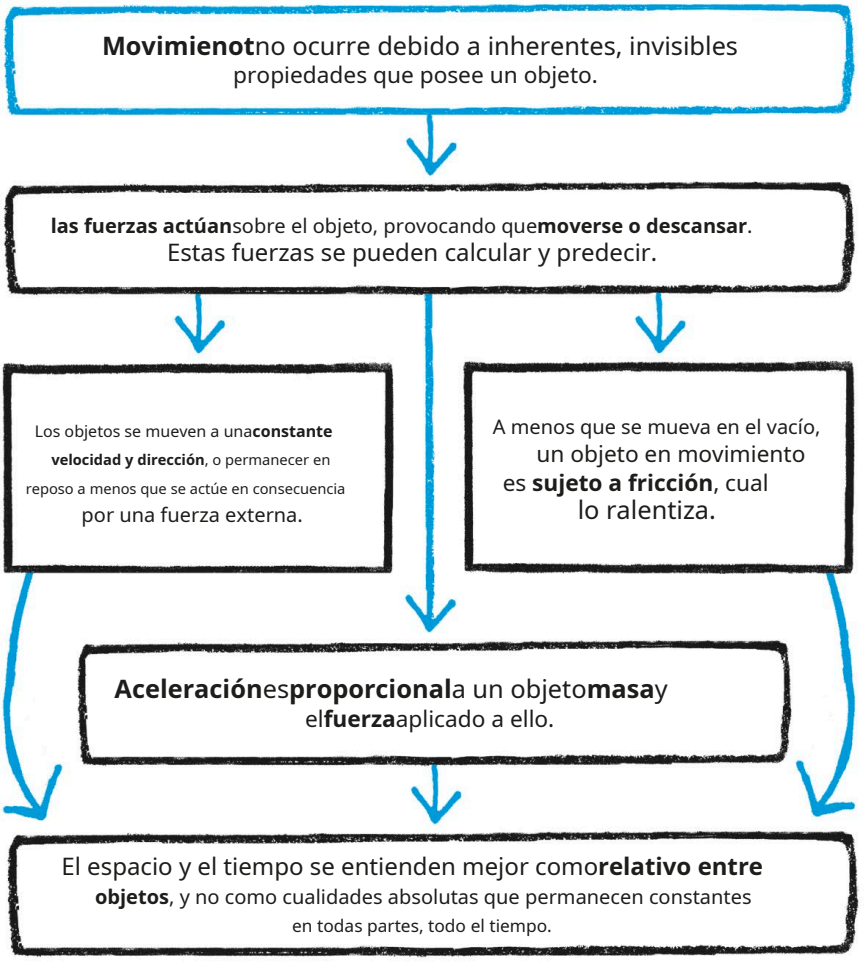
debido a la inercia, y describió el papel de la fricción al detener un libro que se desliza sobre una mesa.

Estos científicos sentaron las bases para que el filósofo francés René Descartes y el erudito alemán Gottfried Leibniz formularan sus propias ideas sobre el movimiento, y para que el físico inglés Isaac Newton uniera todos los hilos en *Principios matemáticos de la filosofía natural* (*Principios*).

Una nueva comprensión

En *Principios de Filosofía*, Descartes propuso sus tres leyes del movimiento, que rechazaban las ideas de Aristóteles sobre el movimiento y un universo divinamente guiado, y explicaban el movimiento en términos de fuerzas, impulso y colisiones. En su 1687 *Ensayo sobre dinámica*, Leibniz realizó una crítica de las leyes del movimiento de Descartes. Al darse cuenta de que muchas de las críticas de Descartes a Aristóteles estaban justificadas, Leibniz pasó a desarrollar sus propias teorías sobre la "dinámica", su término para referirse al movimiento y al impacto, durante la década de 1690.

El trabajo de Leibniz quedó inacabado y posiblemente se desanimó después de leer el de Newton.



leyes completas del movimiento en *Principios*, que—como *Dinámica*— también se publicó en 1687. Newton respetó el rechazo de Descartes a las ideas aristotélicas, pero argumentó que los cartesianos (seguidores de Descartes) no hizo suficiente uso de las técnicas matemáticas de Galileo, ni de los métodos experimentales del químico Robert Boyle. Sin embargo, las dos primeras leyes del movimiento de Descartes ganaron el apoyo tanto de Newton como de Leibniz y se convirtieron en la base de la primera ley del movimiento de Newton.

Las tres leyes del movimiento de Newton (véanse las páginas 44 y 45) explicaron claramente las fuerzas que actúan sobre todos los cuerpos, revolucionaron la comprensión de la mecánica del mundo físico y sentaron las bases de la mecánica clásica (el estudio del movimiento de los cuerpos). No todas las opiniones de Newton fueron aceptadas durante su vida (uno de los que suscitó críticas fue el propio Leibniz), pero después de su muerte no fueron cuestionadas en gran medida hasta principios del siglo XX, al igual que las creencias de Aristóteles sobre el movimiento.

La bicicleta está en movimiento.debido a la fuerza ejercida por el pedaleo del ciclista, hasta que la fuerza externa de la roca actúa sobre él, provocando que se detenga.

Bicicleta en movimiento debido a que la fuerza proporcionada por el pedaleo del ciclista es mayor que la fricción y el arrastre (resistencia del aire)

El ciclista vuela por encima del manillar, ya que el conductor no ha actuado sobre él.

fuerza externa (la roca)

Suministros de roca externos fuerza, mayor en cantidad que el movimiento hacia adelante de la bicicleta, que detiene la bicicleta

Por ejemplo, ¿por qué finalmente se detiene? De hecho, a medida que la pelota rueda experimenta una fuerza externa: la fricción, que hace que desacelere. Según la segunda ley de Newton, un objeto acelerará en la dirección de la fuerza neta. Dado que la fuerza de fricción es opuesta a la dirección de viaje, esta aceleración hace que el objeto se desacelere y finalmente se detenga. En el espacio interestelar, una nave espacial continuará moviéndose a la misma velocidad debido a la ausencia de fricción y resistencia del aire, a menos que sea acelerada por el campo gravitacional de un planeta o estrella, por ejemplo.

había dominado el pensamiento científico durante la mayor parte de 2.000 años. Sin embargo, algunas de las opiniones de Leibniz sobre el movimiento y sus críticas a Newton estaban muy adelantadas a su tiempo y recibieron crédito de la teoría general de la relatividad de Albert Einstein dos siglos después.

Ley de inercia

La primera ley del movimiento de Newton, que a veces se llama ley de inercia, explica que un objeto en reposo permanece en reposo y un objeto en movimiento permanece en movimiento con la misma velocidad a menos que actúe sobre él una fuerza externa. Por ejemplo, si la rueda delantera de una bicicleta que se conduce a gran velocidad golpea una roca grande, la bicicleta será atacada por un fuerza externa, provocando que se detenga. Desafortunadamente para el ciclista, él o ella no habrá recibido la misma fuerza y continuará en movimiento, sobre el manillar.

Por primera vez, la ley de Newton permitió realizar predicciones precisas del movimiento. La fuerza se define como un empujón o tirón ejercido sobre un objeto por otro y se mide en Newtons (denotado como N, donde 1N es la fuerza necesaria para darle a una masa de 1 kg una aceleración de 1m/s^2). Si la fuerza de todas las fuerzas sobre un

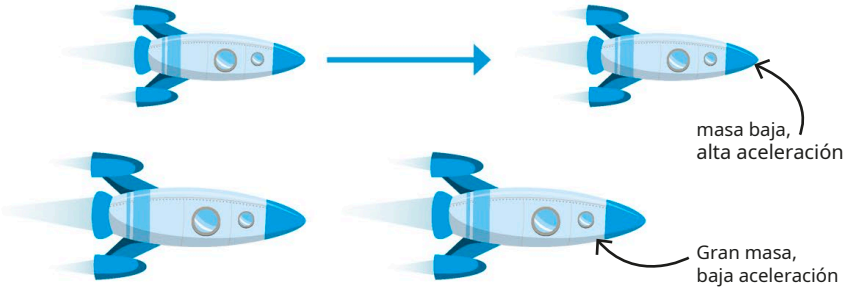
Se conocen los objetos, es posible calcular la fuerza externa neta (el total combinado de las fuerzas externas), expresada como∑F (∑significa "suma de"). Por ejemplo, si una pelota tiene una fuerza de 23 N empujándola hacia la izquierda y una fuerza de 12 N empujándola hacia la derecha, ∑F= 11N en dirección izquierda. No es tan simple como esto, ya que la fuerza de gravedad hacia abajo también actuará sobre la pelota, por lo que también deben tenerse en cuenta las fuerzas netas horizontales y verticales.

Hay otros factores en juego. La primera ley de Newton establece que un objeto en movimiento sobre el que no actúan fuerzas externas debe continuar moviéndose en línea recta a velocidad constante. Pero cuando se hace rodar una pelota por el suelo, por ejemplo

El cambio es proporcional

La segunda ley de Newton es una de las más importantes de la física y describe cuánto se acelera un objeto cuando se le aplica una fuerza neta determinada. Afirma que la tasa de cambio de la velocidad de un cuerpo El impulso (el producto de su masa y su velocidad) es proporcional a la fuerza aplicada y tiene lugar en la dirección de la fuerza aplicada.

Esto se puede expresar como ∑F= mamá, dóndeFes la fuerza neta, aes la aceleración del objeto en la dirección de la fuerza neta, ymetro es su masa. Si la fuerza aumenta, también aumenta la aceleración. Además, la tasa de cambio del impulso es inversamente proporcional a la masa del



Dos cohetes con diferentes masas.pero motores idénticos acelerarán a ritmos diferentes. El cohete más pequeño acelerará más rápidamente debido a su menor masa.

> Las leyes del movimiento...
> son los libres
> decretos de Dios.
> **Gottfried Leibniz**

objeto, por lo que si la masa del objeto aumenta, su aceleración disminuye. Esto se puede expresar como$a=\sum F/\text{metro}$. Por ejemplo, a medida que el combustible de un cohete se quema durante el vuelo, su masa disminuye y, suponiendo que el empuje de sus motores siga siendo el mismo, acelerará a un ritmo cada vez más rápido.

Igual acción y reacción

La tercera ley de Newton establece que por cada acción hay una reacción igual y opuesta. Al sentarse, una persona ejerce una fuerza hacia abajo sobre la silla y la silla ejerce una fuerza igual hacia arriba sobre el cuerpo de la persona. Una fuerza se llama acción y la otra reacción. Un rifle retrocede después de ser disparado debido a las fuerzas opuestas de tal acción-reacción. Cuando se aprieta el gatillo del rifle, un

La explosión de pólvora crea gases calientes que se expanden hacia afuera, permitiendo que el rifle empuje la bala hacia adelante. Pero la bala también empuja hacia atrás el rifle. La fuerza que actúa sobre el rifle es la misma que la fuerza que actúa sobre la bala, pero como la aceleración depende de la fuerza y la masa (de acuerdo con la segunda ley de Newton), la bala acelera mucho más rápido que el rifle debido a su masa mucho menor.

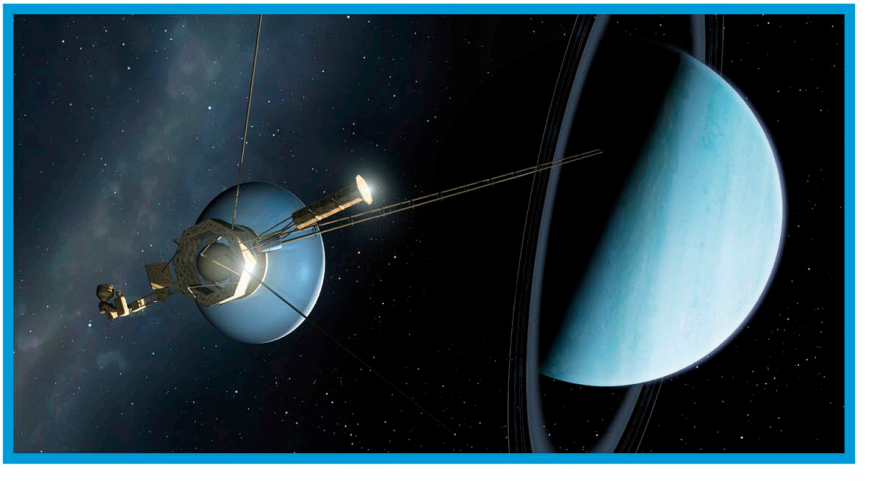
Las nociones de tiempo, distancia y aceleración son fundamentales para comprender el movimiento. Newton argumentó que el espacio y el tiempo son entidades por derecho propio, que existen independientemente de la materia. En 1715-1716, Leibniz argumentó a favor de una alternativa relacionista: en otras palabras, que el espacio y el tiempo son sistemas de relaciones entre objetos. Mientras Newton creía que el tiempo absoluto existe independientemente de cualquier observador y progresa a un ritmo constante en todo el universo, Leibniz razonó que el tiempo no tiene sentido excepto cuando se entiende como el movimiento relativo de los cuerpos. Newton argumentó que el espacio absoluto "permanece siempre similar e inamovible", pero su crítico alemán argumentó que sólo tiene sentido como la ubicación relativa de los objetos.

De Leibniz a Einstein

Un enigma planteado por el obispo y filósofo irlandés George Berkeley alrededor de 1710 ilustró problemas con los conceptos de Newton de tiempo, espacio y velocidad absolutos. Él se refería a una esfera giratoria: Berkeley cuestionó si, si estuviera girando en un universo vacío, se podría decir que tenía algún movimiento. Aunque las críticas de Leibniz a Newton fueron en general

> En realidad, el movimiento no es más que un cambio de lugar.
> Entonces movimiento como nosotros experiencia no es nada sino una relación.
> **Gottfried Leibniz**

Desestimadas en su momento, la teoría general de la relatividad de Einstein (1907-1915) les dio más sentido dos siglos después. Si bien las leyes del movimiento de Newton son generalmente válidas para objetos macroscópicos (objetos que son visibles a simple vista) en condiciones cotidianas, se descomponen a velocidades muy altas, a escalas muy pequeñas y en campos gravitacionales muy fuertes.



Dos naves espaciales Voyagerse lanzaron en 1977. Sin fricción ni resistencia del aire en el espacio, las naves todavía se mueven por el espacio hoy en día, debido a la primera ley del movimiento de Newton.

EL SISTEMA DEL MUNDO

LEYES DE GRAVEDAD

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
isaac newton(1642-1727)

ANTES
1543 Nicolás Copérnico desafía el pensamiento ortodoxo con un modelo heliocéntrico del sistema solar.

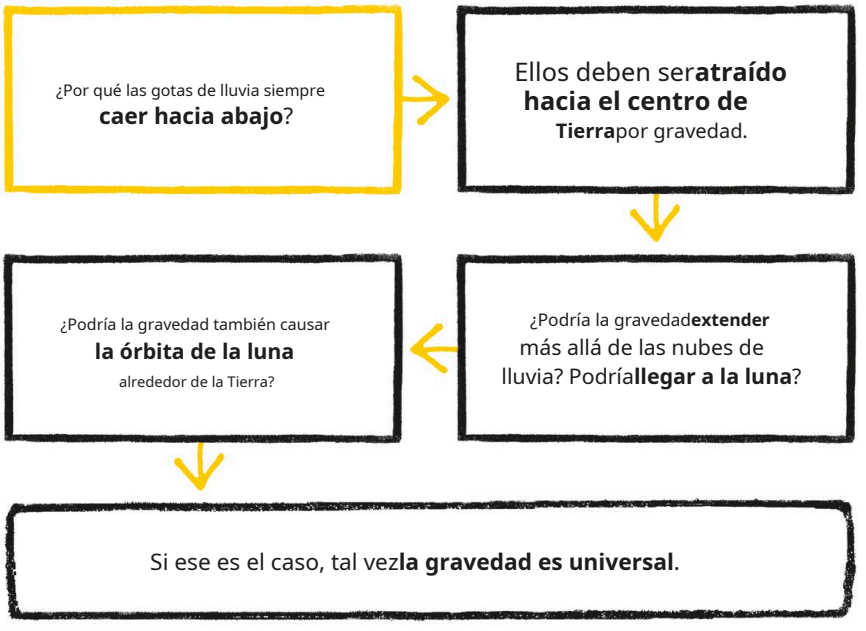
1609 Juan Kepler publica sus dos primeras leyes del movimiento planetario en*Astronomía Nova*(*Una nueva astronomía*), argumentando que los planetas se mueven libremente en órbitas elípticas.

DESPUÉS
1859astrónomo francés Urbain Le Verrier sostiene que la órbita precesionaria de Mercurio (la ligera variación en su rotación axial) es incompatible con la mecánica newtoniana.

1905 En su artículo "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", Einstein presenta su teoría de la relatividad especial.

1915 La teoría de la relatividad general de Einstein establece que la gravedad afecta al tiempo, la luz y la materia.

> ¿Qué obstaculiza la estrellas fijas para que no caigan el uno sobre el otro?
> **isaac newton**



PAG

Publicada en 1687, la ley de gravitación universal de Newton permanece junto con su leyes del movimiento: la base indiscutible de la "mecánica clásica" durante más de dos siglos. Afirma que cada partícula atrae a todas las demás con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros.

Antes de la era científica en la que se formularon las ideas de Newton, la comprensión occidental del mundo natural había estado dominada por los escritos de Aristóteles. El antiguo filósofo griego no tenía ningún concepto de gravedad; en cambio, creía que los objetos pesados caían a la Tierra porque ese era su "lugar natural" y que los cuerpos celestes se movían alrededor de la Tierra en círculos porque eran perfectos. La visión geocéntrica de Aristóteles permaneció prácticamente indiscutida hasta el Renacimiento, cuando el astrónomo polaco-italiano Nicolás Copérnico defendió una visión heliocéntrica.

modelo del sistema solar, con la Tierra y los planetas orbitando alrededor del sol. Según él, "giramos alrededor del sol como cualquier otro planeta". Sus ideas, publicadas en 1543, se basaban en observaciones detalladas de Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno realizadas a simple vista.

Evidencia astronómica

En 1609, Johannes Kepler publicó *Astronomía Nova* (*Una nueva astronomía*) que, además de proporcionar más apoyo al heliocentrismo, describía las órbitas elípticas (en lugar de circulares) de los planetas. Kepler también descubrió que la velocidad orbital de cada planeta depende de su distancia al sol.

Casi al mismo tiempo, Galileo Galilei pudo corroborar la visión de Kepler con observaciones detalladas realizadas con la ayuda de telescopios. Cuando enfocó un telescopio hacia Júpiter y vio lunas orbitando el planeta gigante, Galileo descubrió más pruebas de que Aristóteles había

Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com

Ver también: Caída libre 32–35 · Leyes del movimiento 40–45 Los cielos 270–71 · Modelos del universo 272–73 · Relatividad especial 276–79 El principio de equivalencia 281 · Ondas gravitacionales 312-15

El nuevo Almagesto, una obra de Riccioli de 1651, ilustra la lucha entre modelos rivales de movimiento planetario: se muestra que la teoría centrada en la Tierra de Tycho Brahe pesa más que el heliocentrismo.

Se ha equivocado: si todas las cosas orbitaran la Tierra, las lunas de Júpiter no podrían existir. Galileo también observó las fases de Venus, demostrando que orbita alrededor del sol.

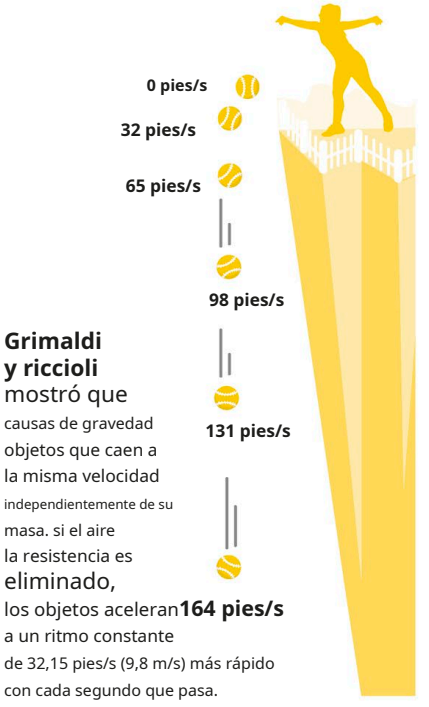
Galileo también cuestionó la idea de que los objetos pesados caen al suelo más rápidamente que los objetos ligeros. Su argumento fue apoyado por los sacerdotes jesuitas italianos Giovanni Battista Riccioli y Francesco Maria Grimaldi, quienes en la década de 1640 arrojaron objetos desde una torre de Bolonia y calcularon el tiempo de su descenso hasta la calle de abajo. Sus cálculos proporcionaron valores razonablemente precisos para la tasa de aceleración debida a la gravedad, que ahora se sabe que es 32,15 pies/s.^{2} (9,8 m/s^2). Su experimento fue recreado en 1971 por el astronauta estadounidense David Scott, quien dejó caer un martillo y una pluma en la misión Apolo 15 de la NASA. Sin resistencia del aire en la superficie de la luna, los dos objetos chocaron contra la Tierra al mismo tiempo.

manzana de newton

Si bien la historia de una manzana que cayó sobre la cabeza de Isaac Newton es apócrifa, ver la fruta caer al suelo despertó su curiosidad. Cuando Newton empezó a pensar seriamente en la gravedad en la década de 1660, ya se habían realizado muchos trabajos preliminares importantes. En su obra fundamental *Principios*, Newton dio crédito al trabajo del físico italiano Giovanni Borelli (1608-1679) y del astrónomo francés Ismael Bullialdus (1605-1694), quienes describieron la gravedad del Sol ejerciendo una fuerza de atracción. Bullialdus creía incorrectamente que la gravedad del sol atraía a un planeta en su afelio (el punto de su curva orbital cuando está más alejado del sol) pero lo rechazaba en el perihelio (cuando está más cerca).

La obra de Johannes Kepler fue probablemente la mayor influencia en las ideas de Newton. La tercera ley de los orbitales del astrónomo alemán

> Si la Tierra dejara de atraer hacia sí sus aguas, todas las aguas del mar serían levantado y fluiría hacia el cuerpo de la luna. **Juan Kepler**



Grimaldi y riccioli mostró que causas de gravedad objetos que caen a la misma velocidad independientemente de su masa. si el aire la resistencia es eliminado, los objetos aceleran a un ritmo constante de 32,15 pies/s (9,8 m/s) más rápido con cada segundo que pasa.

El movimiento establece que existe una relación matemática exacta entre la distancia de un planeta al sol y el tiempo que tarda en completar una órbita completa.

En 1670, el filósofo natural inglés Robert Hooke argumentó que la gravitación se aplica a todos los cuerpos celestes y que su poder disminuye con la distancia y, en ausencia de otras fuerzas de atracción, se mueve en línea recta. En 1679, había llegado a la conclusión de que se aplicaba la ley del cuadrado inverso, por lo que la gravedad se debilita en proporción al cuadrado de la distancia a un cuerpo. En otras palabras, si se duplica la distancia entre el Sol y otro cuerpo, la fuerza entre ellos se reduce a sólo una cuarta parte de la fuerza original. Sin embargo, se desconocía si esta regla podría aplicarse cerca de la superficie de un cuerpo planetario grande como la Tierra.

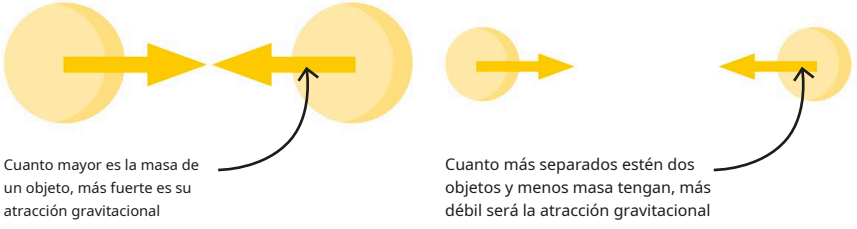
Universalidad de la caída libre.

El principio de universalidad de la caída libre fue descubierto empíricamente por Galileo y otros, y luego demostrado matemáticamente por Newton. Afirma que todos los materiales, pesados o ligeros, caen al mismo ritmo en un campo gravitacional uniforme. Consideremos la caída de dos cuerpos de diferente peso. Dado que la teoría de la gravedad de Newton dice que cuanto mayor es la masa de un objeto, mayor es la fuerza gravitacional, el objeto pesado debería caer más rápido.

Sin embargo, su segunda ley del movimiento nos dice que una masa más grande no acelera tan rápido como una más pequeña si la fuerza aplicada es la misma, por lo que caerá más lentamente. De hecho, los dos se cancelan entre sí, por lo que los objetos ligeros y pesados caerán con la misma aceleración siempre que no haya otras fuerzas presentes, como la resistencia del aire.

La torre Asinelli En Bolonia, Italia, fue el lugar elegido para los experimentos de caída libre de Riccioli y Grimaldi, en los que se puso a prueba la teoría de Galileo.

Newton argumentó que la gravedad Es una fuerza de atracción universal que se aplica a toda la materia, por grande o pequeña que sea. Su fuerza varía según la masa que tengan los objetos y la distancia entre ellos.



Cuanto mayor es la masa de un objeto, más fuerte es su atracción gravitacional

Cuanto más separados estén dos objetos y menos masa tengan, más débil será la atracción gravitacional

gravedad universal

Newton publicó sus propias leyes del movimiento y la gravitación en*Principios* en 1687, afirmando que "Cada partícula atrae a todas las demás partículas... con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas". Él Explicó cómo toda materia ejerce una fuerza de atracción (la gravedad) que atrae otra materia hacia su centro. Es una fuerza universal, cuya fuerza depende de la masa del objeto. Por ejemplo, el Sol tiene una fuerza gravitacional mayor que la Tierra, que a su vez tiene más fuerza gravitacional que la Luna, que a su vez tiene más fuerza gravitacional que una pelota que se deja caer sobre ella. La fuerza gravitacional se puede expresar con la ecuación.$F=GM_{1}M_{2}/r^{2}$, dónde$F$es la fuerza,$metro_{1}$y$metro_{2}$son las masas de los dos cuerpos,$r$es la distancia entre sus centros, y$GRAMO$es la constante gravitacional.

Newton continuó refinando sus puntos de vista mucho después de la publicación de *Principios*. Su experimento mental con una bala de cañón especuló sobre la trayectoria de una bala disparada desde un cañón en la cima de una montaña muy alta en un entorno en el que no había resistencia del aire. Si la gravedad tampoco estuviera presente, argumentó que la bala de cañón seguiría una línea recta alejándose de la Tierra en dirección al fuego. Suponiendo que la gravedad esté presente, si la velocidad de la bala de cañón era relativamente lenta, volvería a caer a la Tierra, pero si se disparaba a una velocidad mucho más rápida, continuaría dando vueltas alrededor de la Tierra en una órbita circular; esta sería su velocidad orbital. Si su velocidad fuera aún mayor, la pelota continuaría viajando alrededor de la Tierra en una órbita elíptica. Si alcanzara una velocidad superior a 11,2 km/s (7 millas/s), abandonaría el campo gravitacional de la Tierra y viajaría hacia el espacio exterior.

Más de tres siglos después, la física moderna ha puesto en práctica las teorías de Newton. El fenómeno de la bala de cañón se puede observar cuando se pone en órbita un satélite o una nave espacial. En lugar de la pólvora que

> El sinsentido caerá por su propio peso, por una especie de ley intelectual de gravitación.
> Y una nueva verdad irá en órbita.
> **Cecilia Payne Gaposchkin**
> **astrónomo británico-estadounidense**

Detonó el proyectil imaginario de Newton, potentes motores de cohetes elevan el satélite de la superficie de la Tierra y le dan velocidad de avance. Cuando alcanza su velocidad orbital, la propulsión de la nave espacial cesa y cae alrededor de la Tierra, sin tocar nunca la superficie. El ángulo de la trayectoria del satélite está determinado por su ángulo inicial y su velocidad. El éxito de la exploración espacial ha dependido en gran medida de las leyes de gravitación de Newton.

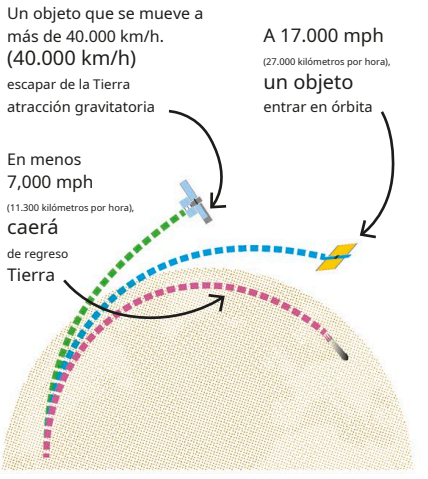
Entendiendo la masa

La masa inercial de un objeto es su resistencia inercial a la aceleración de cualquier fuerza, gravitacional o no. Está definido por la segunda ley del movimiento de Newton como F=mamá, dónde F es la fuerza aplicada, metro es su masa inercial, y a es la aceleración. Si se aplica una fuerza conocida al objeto, al medir su aceleración se encuentra que la masa inercial es F/a. Por el contrario, según la ley de gravitación universal de Newton, la masa gravitacional es la propiedad física de un objeto que hace que interactúe con otros objetos a través de la fuerza gravitacional. A Newton le preocupaba la pregunta: ¿la masa inercial de un objeto es la misma? como su masa gravitacional? Experimentos repetidos han demostrado que las dos propiedades son iguales, un hecho que fascinó a Albert Einstein, quien lo utilizó como base para su teoría de la relatividad general.

Reinterpretando la gravitación

Las ideas de Newton sobre la gravitación y el movimiento universales no fueron cuestionadas hasta 1905, cuando se publicó la teoría de la relatividad especial de Einstein. Mientras que la teoría de Newton dependía del supuesto de que la masa, el tiempo y la distancia permanecen constantes, la teoría de Einstein los trata como entidades fluidas definidas por el marco de referencia del observador. Una persona está parado en la Tierra mientras gira sobre su eje, orbita alrededor del sol y se mueve a través del universo en un marco de referencia diferente al de un astronauta que vuela por el espacio en una nave espacial. La teoría de la relatividad general de Einstein también afirma que la gravedad no es una fuerza, sino el efecto de la distorsión del espacio-tiempo por objetos masivos.

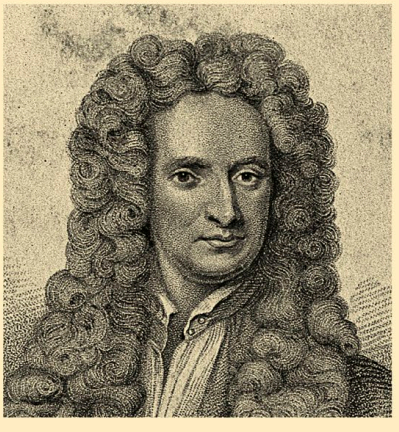
Las leyes de Newton son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones cotidianas, pero no pueden explicar las diferencias de movimiento, masa, distancia y tiempo que resultan cuando los cuerpos se mueven.



Newton predijo correctamente que los objetos orbitarían la Tierra si fueran lanzados a la velocidad correcta. Si un satélite se mueve lo suficientemente rápido, la curvatura de su caída es menor que la de la Tierra, por lo que permanece en órbita y nunca regresa a la Tierra.

observado desde dos marcos de referencia muy diferentes. En este caso, los científicos deben confiar en las teorías de la relatividad de Einstein. La mecánica clásica y las teorías de la relatividad de Einstein coinciden siempre que la velocidad de un objeto sea baja o el campo gravitacional que experimente sea pequeño.

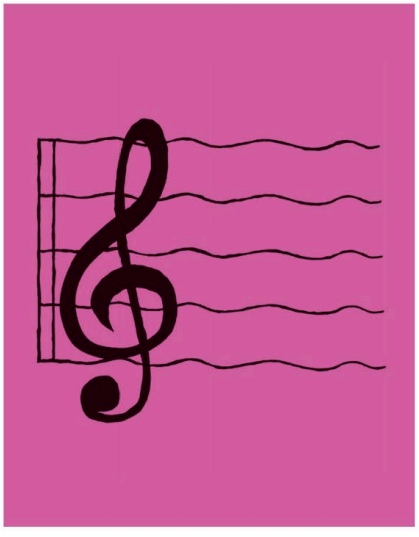
isaac newton



Nacido en el pueblo inglés de Woolsthorpe el día de Navidad de 1642, Newton fue a la escuela en Grantham y estudió en la Universidad de Cambridge. En *Principios*, formuló las leyes de la gravitación y el movimiento universales, que formaron la base de la mecánica clásica hasta principios del siglo XX, cuando fueron parcialmente reemplazadas por las teorías de la relatividad de Einstein. Newton también hizo importantes contribuciones a las matemáticas y la óptica. A veces un personaje controvertido, tuvo largas disputas con Gottfried Leibniz. sobre quién había descubierto el cálculo y Robert Hooke sobre la ley del cuadrado inverso. Además de ser un científico entusiasta, Newton estaba muy interesado en la alquimia y la cronología bíblica. Murió en Londres en 1727.

Trabajos clave

1684 *Sobre el movimiento de los cuerpos en órbita*
1687 *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*)



LA OSCILACIÓN ES EN TODOS LADOS

MOVIMIENTO ARMÓNICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Leonhard Euler(1707-1783)

ANTES
1581 Galileo descubre el vínculo entre la longitud de un péndulo y su período de movimiento.

1656 Christiaan Huygens construye un reloj de péndulo que utiliza el movimiento periódico de un péndulo para regular un mecanismo de cronometraje.

DESPUÉS
1807 Joseph Fourier, un físico francés, demuestra que cualquier proceso periódico puede ser tratado como la suma de oscilaciones armónicas simples superpuestas unas sobre otras.

1909ingeniero alemán Hermann Frahm desarrolla un "amortiguador dinámico de vibraciones", un dispositivo que absorbe energía de las oscilaciones y la libera de forma desincronizada para reducir la vibración.

PAG

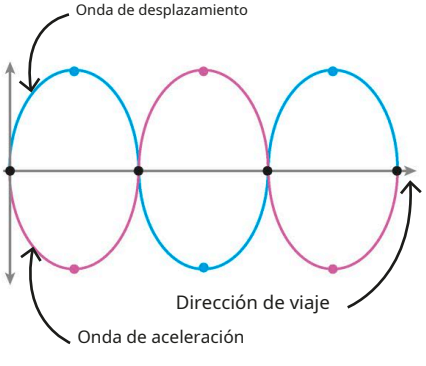
movimiento periódico—movimiento repetido en intervalos de tiempo iguales, se encuentra en muchos fenómenos naturales y artificiales. Los estudios de péndulos en los siglos XVI y XVII, por ejemplo, ayudaron a sentar las bases de las leyes del movimiento de Isaac Newton. Pero por muy innovadoras que fueran estas leyes, los físicos aún enfrentaban grandes barreras al aplicarlas a problemas del mundo real que involucraban sistemas (grupos de elementos que interactúan) que eran más complejos que los cuerpos idealizados y en libre movimiento de Newton.

Oscilaciones musicales

Un área particular de interés fue la vibración de las cuerdas musicales, otra forma de movimiento periódico. En la época de Newton, el principio de que las cuerdas vibran a diferentes frecuencias para producir diferentes sonidos estaba bien establecido, pero la forma exacta de las vibraciones no estaba clara. En 1732, el físico y matemático suizo Daniel Bernoulli encontró una manera de aplicar la segunda ley del movimiento de Newton a cada segmento de una cuerda vibrante.

Demostró que la fuerza sobre la cuerda crecía a medida que se alejaba de la línea central (su punto de partida estacionario), y siempre actuaba en dirección opuesta al desplazamiento desde el centro. Mientras tendía a restaurar la cuerda hacia el centro, se sobrepasó hacia el otro lado, creando un ciclo repetitivo.

Este tipo de movimiento, con una relación específica entre desplazamiento y fuerza restauradora, se conoce hoy como movimiento armónico simple. Además de vibrar cuerdas, abarca fenómenos como el balanceo de un péndulo y un peso que rebota en el extremo de un resorte. Bernoulli también descubrió que las oscilaciones armónicas se trazaban



Para cualquier sistema En el movimiento armónico simple, el desplazamiento y la aceleración pueden describirse mediante oscilaciones de ondas sinusoidales que son imágenes especulares entre sí.

Ver también: Medición del tiempo 38–39 ■ Leyes del movimiento 40–45 Energía cinética y energía potencial 54 Música 164–167

> Nada sucede en el mundo cuyo significado no es el de un máximo o un mínimo.
> **Leonhard Euler**

en un gráfico forman una onda sinusoidal, una función matemática que se manipula fácilmente para encontrar soluciones a problemas físicos. El movimiento armónico también se puede aplicar en algunos lugares más sorprendentes.

Por ejemplo, tanto el movimiento circular (por ejemplo, un satélite que orbita la Tierra) como la rotación de los objetos (la Tierra gira sobre su eje) podrían tratarse como oscilaciones hacia adelante y hacia atrás en dos o más direcciones.

Usando la ley de Newton

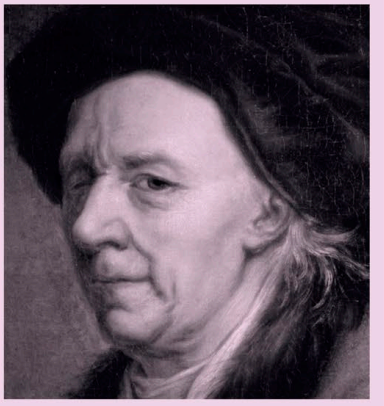
El matemático y físico suizo Leonhard Euler estaba intrigado por las fuerzas que hacen que los barcos cabecen (se balanceen hacia arriba y hacia abajo a lo largo de proa a popa) y se balanceen (se inclinen de lado a lado). Alrededor de 1736, se dio cuenta de que el movimiento de un barco podía dividirse en un elemento de traslación (un movimiento entre dos lugares) y un elemento de rotación.

Buscando una ecuación para describir la parte de rotación del movimiento, Euler se basó en Daniel

Los trabajos anteriores de Bernoulli finalmente dieron con una forma que reflejaba la estructura de la segunda ley de Newton. En 1752, Euler fue la primera persona en expresar esa famosa ley en la ahora familiar ecuación F=mamá(la fuerza que actúa sobre un cuerpo es igual a su masa multiplicada por su aceleración). Paralelamente, su ecuación de rotación establece que: l=Identificación-/dt, dóndeles el par (la fuerza de rotación que actúa sobre el objeto),Ies el "momento de inercia" del objeto (en términos generales, su resistencia al giro), yd-/dt es la tasa de cambio de su velocidad angular (en otras palabras, su "aceleración angular").

Movimiento armónico simple ha demostrado tener innumerables aplicaciones, incluso en campos con los que ni siquiera se podía soñar en la época de Euler, que van desde aprovechar las oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos en circuitos eléctricos hasta mapear las vibraciones de los electrones entre niveles de energía en los átomos.

Como un joven médico En la marina rusa, Leonhard Euler quedó fascinado por la forma en que las ondas afectan el movimiento de los barcos.



Leonhard Euler

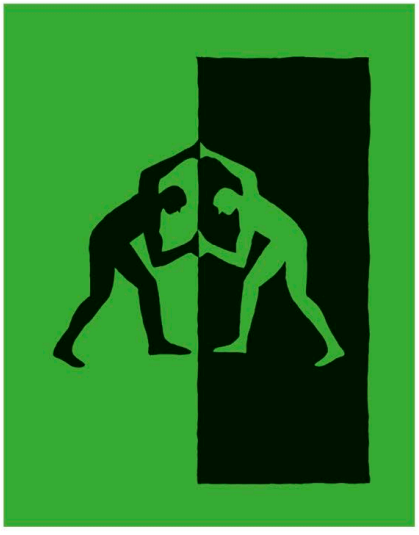
Nacido en una familia religiosa en Basilea, Suiza, en 1707, Leonhard Euler fue el matemático más importante de su generación y se interesó por las matemáticas puras y sus múltiples aplicaciones, incluido el diseño de barcos, la mecánica, la astronomía y la teoría musical.

Euler ingresó a la universidad de Basilea a la edad de 13 años y estudió con Johann Bernoulli. Pasó 14 años enseñando e investigando en la Academia Imperial Rusa en San Petersburgo.

Petersburgo, antes de que Federico el Grande lo invitara a Berlín. A pesar de perder la vista de un ojo en 1738 y del otro en 1766, Euler continuó trabajando a un ritmo prodigioso, estableciendo varias áreas de investigación matemática completamente nuevas. A su regreso a San Petersburgo, continuó trabajando hasta que murió de una hemorragia cerebral en 1783.

Trabajos clave

1736 *Mecánica*
1744 *Un método para encontrar líneas curvas que disfruten de propiedades de máximo o mínimo.* **1749** *ciencia naval*
1765 *Teoría sobre el movimiento de cuerpos sólidos o rígidos.*



NO HAY DESTRUCCIÓN DE FUERZA

ENERGÍA CINÉTICA Y ENERGÍA POTENCIAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Émilie du Châtelet
(1706-1749)

ANTES
1668 John Wallis propone una ley de conservación del impulso, la primera en su forma moderna.

DESPUÉS
1798 El físico británico nacido en Estados Unidos Benjamin Thompson, el conde Rumford, hace mediciones que sugieren que el calor es otra forma de energía cinética, que contribuye a la energía total de un sistema.

1807 El erudito británico Thomas Young utiliza por primera vez el término "energía" para *vis viva* investigado por du Châtelet.

1833 El matemático irlandés William Rowan Hamilton muestra cómo se puede pensar en la evolución de un sistema mecánico en términos del equilibrio cambiante entre las energías potencial y cinética.

Las leyes del movimiento de Saac Newton incorporaron la idea fundamental de que la suma del momento en todos los objetos involucrados es la misma antes y después de una colisión. Sin embargo, tenía poco que decir sobre el concepto de energía tal como se entiende hoy. En la década de 1680, Gottfried Leibniz observó que otra propiedad de los cuerpos en movimiento, a la que llamó *vis viva* ("fuerza viva"), también parecían conservarse.

La idea de Leibniz fue ampliamente rechazada por los seguidores de Newton, quienes consideraban que la energía y el impulso deberían ser indistinguibles, pero fue revivida en la década de 1740. La filósofa francesa Marquise Émilie du Châtelet, que estaba trabajando en una traducción de Newton *Principios*, demostrado *vis viva* La importancia de. Repitió un experimento, realizado por primera vez por Gravesande del filósofo holandés Willem, en el que dejó caer bolas de metal de diferentes pesos en arcilla desde varias alturas y midió la profundidad de los cráteres resultantes. Esto demostró que una bola que viajaba dos veces más rápido creaba un cráter cuatro veces más profundo.

Du Châtelet concluyó que el valor de cada bola *vis viva* (En términos generales, el mismo concepto que la energía cinética moderna atribuida a las partículas en movimiento) era proporcional a su masa pero también al cuadrado de su velocidad (mv^2). Ella planteó la hipótesis de que desde *vis viva* fue claramente conservado (o transferido al por mayor) en tales colisiones, debe existir en una forma diferente cuando el peso fue suspendido antes de su caída. Esta forma ahora se conoce como energía potencial y se atribuye a la posición de un objeto dentro de un campo de fuerza.

> La física es un inmenso edificio que sobrepasa el poderes de un solo hombre.
> **Émilie du Châtelet**

Ver también: Impulso 37 · Leyes del movimiento 40–45 Energía y movimiento 56–57 · Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142-147

LA ENERGÍA PUEDE SER NI CREADO NI DESTRUIDO

LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
James Joule(1818–1889)

ANTES

1798 Benjamin Thompson, el conde Rumford, utiliza el cañón de un cañón sumergido en agua y perforado con una herramienta desafilada para demostrar que el calor se crea a partir del movimiento mecánico.

DESPUÉS

1847 En su artículo "Sobre la conservación de la fuerza", el físico alemán Hermann von Helmholtz explica la convertibilidad de todas las formas de energía.

1850 El ingeniero civil escocés William Rankine es el primero en utilizar la frase "la ley de conservación de la energía" para describir el principio.

1905 En su teoría de la relatividad, Albert Einstein introduce su principio de equivalencia masa-energía: la idea de que todo objeto, incluso en reposo, tiene energía equivalente a su masa.

La ley de conservación de la energía establece que la energía total de un sistema aislado permanece constante en el tiempo. La energía no se puede crear ni destruir, pero se puede transformar de una forma a otra.

Aunque el químico y físico alemán Julius von Mayer propuso por primera vez la idea en 1841, el mérito es frecuentemente otorgado al físico británico James Joule. En 1845, Joule publicó los resultados de un experimento clave. Diseñó un aparato con un peso que caía para hacer girar una rueda de paletas en un cilindro de agua aislado, utilizando la gravedad para realizar el trabajo mecánico. Al medir el aumento de la temperatura del agua, calculó la cantidad precisa de calor que generaría una cantidad exacta de trabajo mecánico. También demostró que no se perdió energía en la conversión.

El descubrimiento de Joule de que el calor se había creado mecánicamente no fue ampliamente aceptado hasta 1847, cuando Hermann von Helmholtz propuso una relación entre la mecánica, el calor, la luz, la electricidad y magnetismo: cada uno de ellos es una forma de energía. La contribución de Joule fue honrada cuando la unidad estándar de energía recibió su nombre en 1882.

Para su experimento, Joule utilizó este recipiente, lleno de agua, y la rueda de paletas de latón, girada mediante pesas que caían. El aumento de temperatura del agua demostró que el trabajo mecánico generaba calor.

Ver también: Energía y movimiento 56–57 y la Calor y transferencias 80–81 Energía interna primera ley de la termodinámica 86–89 Masa y energía 284–285

UN NUEVO TRATADO EN MECÁNICA

ENERGÍA Y MOVIMIENTO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
José Luis Lagrange
(1736-1813)

ANTES
1743 El físico y matemático francés Jean Le Rond d'Alembert señala que la inercia de un cuerpo que acelera es proporcional y opuesta a la fuerza que provoca la aceleración.

1744 Pierre-Louis Maupertuis, un matemático francés, demuestra que se puede utilizar un "principio de longitud mínima" para el movimiento de la luz para encontrar sus ecuaciones de movimiento.

DESPUÉS
1861 James Clerk Maxwell aplica el trabajo de Lagrange y William Rowan Hamilton para calcular los efectos de los campos de fuerza electromagnéticos.

1925 Erwin Schrodinger deriva su ecuación de onda del principio de Hamilton.

t durante todo el día 18 Durante el siglo XIX, la física avanzó considerablemente a partir de las leyes del movimiento establecidas por Isaac Newton en 1687. Gran parte de este desarrollo fue impulsado por innovaciones matemáticas que hicieron que los principios centrales de las leyes de Newton fueran más fáciles de aplicar a una gama más amplia de problemas.

Una cuestión clave fue cuál es la mejor manera de afrontar el desafío de los sistemas con restricciones, en los que los cuerpos se ven obligados a moverse de forma restringida. Un ejemplo es el movimiento del peso en el extremo de un péndulo fijo, que no puede liberarse de su varilla oscilante. Agregar cualquier forma de restricción complica los cálculos newtonianos considerablemente: en cada punto del movimiento de un objeto, se deben tener en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre él y encontrar su efecto neto.

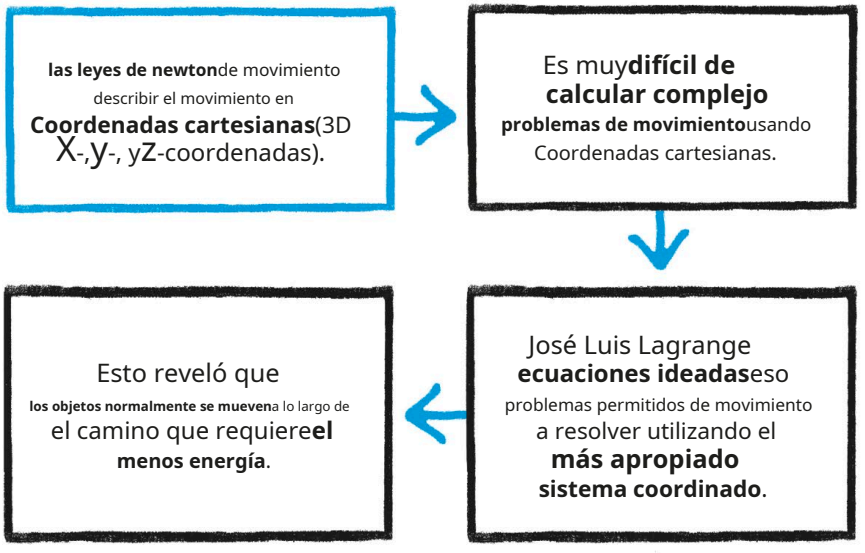
Ecuaciones langrangianas

En 1788, el matemático y astrónomo francés Joseph-Louis Lagrange propuso un nuevo enfoque radical al que llamó "mecánica analítica". Propuso dos técnicas matemáticas que permitieron utilizar más fácilmente las leyes del movimiento en una variedad más amplia de situaciones. El "lagrangiano Las ecuaciones del primer tipo eran simplemente una estructura de ecuación que permitía considerar las restricciones como elementos separados para determinar el movimiento de un objeto u objetos.

Aún más significativas fueron las ecuaciones "del segundo tipo", que abandonaron las "coordenadas cartesianas" implícitas en las leyes de Newton. La fijación de la ubicación en tres dimensiones de René Descartes (comúnmente denominada X,y, yZ) es intuitivamente fácil de interpretar, pero resuelve todos los problemas, excepto los más simples, en newtoniano

> Newton fue el genio más grande que jamás haya existido y el más afortunado, porque no puedo encontrar más de una vez un sistema del mundo para establecer.
>
> **José Luis Lagrange**

Ver también: Leyes del movimiento 40–45 y ecuaciones de Maxwell 142–147 · La conservación de la energía 55. Campos de fuerza · Reflexión y refracción 168–169

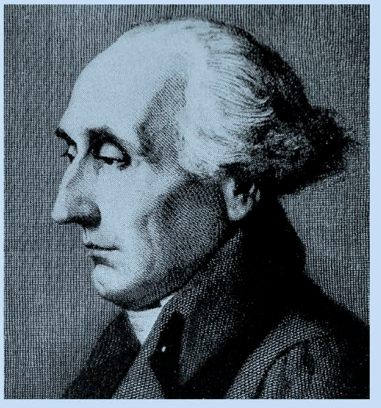


física muy difícil de calcular. El método desarrollado por Lagrange permitió realizar cálculos con cualquier sistema de coordenadas que fuera más apropiado para el problema bajo investigación. La generalización propuesta por Lagrange para las ecuaciones del segundo tipo no fue sólo una herramienta matemática, sino que también señaló el camino hacia una comprensión más profunda de la naturaleza de los sistemas dinámicos.

sistemas de resolución

Entre 1827 y 1833, el matemático irlandés William Rowan Hamilton amplió el trabajo de Lagrange y llevó la mecánica a un nuevo nivel. Basándose en el "principio de tiempo mínimo" en óptica, propuesto por primera vez por el matemático francés Pierre de Fermat en el siglo XVII, Hamilton desarrolló un método para calcular las ecuaciones de movimiento de cualquier sistema basado en un principio de acción mínima (o estacionaria). Ésta es la idea de que los objetos, al igual que los rayos de luz, tenderán a moverse el camino que requiere la menor energía. Utilizando este principio, demostró que cualquier sistema mecánico podía describirse resolviéndolo con un método matemático similar a identificar los puntos de inflexión en un gráfico.

Finalmente, en 1833, Hamilton estableció un nuevo y poderoso enfoque de la mecánica a través de ecuaciones que describían la evolución de un sistema mecánico a lo largo del tiempo, en términos de coordenadas generalizadas y la energía total del sistema (denominada hy ahora conocido como el "hamiltoniano"). hamilton Las ecuaciones permitieron calcular el equilibrio de energías cinética y potencial del sistema para un tiempo particular y, por lo tanto, predijeron no solo las trayectorias de los objetos, sino también sus ubicaciones exactas. Además de su principio general del "tiempo mínimo", demostrarían tener aplicaciones en varias otras áreas de la física, incluida gravitación, electromagnetismo e incluso física cuántica.



José Luis Lagrange

Nacido en Turín, Italia, en 1736, Lagrange estudió derecho antes de interesarse por las matemáticas a la edad de 17 años. A partir de entonces, aprendió por sí mismo y desarrolló sus conocimientos rápidamente, dando conferencias sobre matemáticas y balística en la academia militar de Turín. Posteriormente se convirtió en miembro fundador de la Academia de Ciencias de Turín y publicó trabajos que atrajeron la atención de otros, incluido Leonhard Euler.

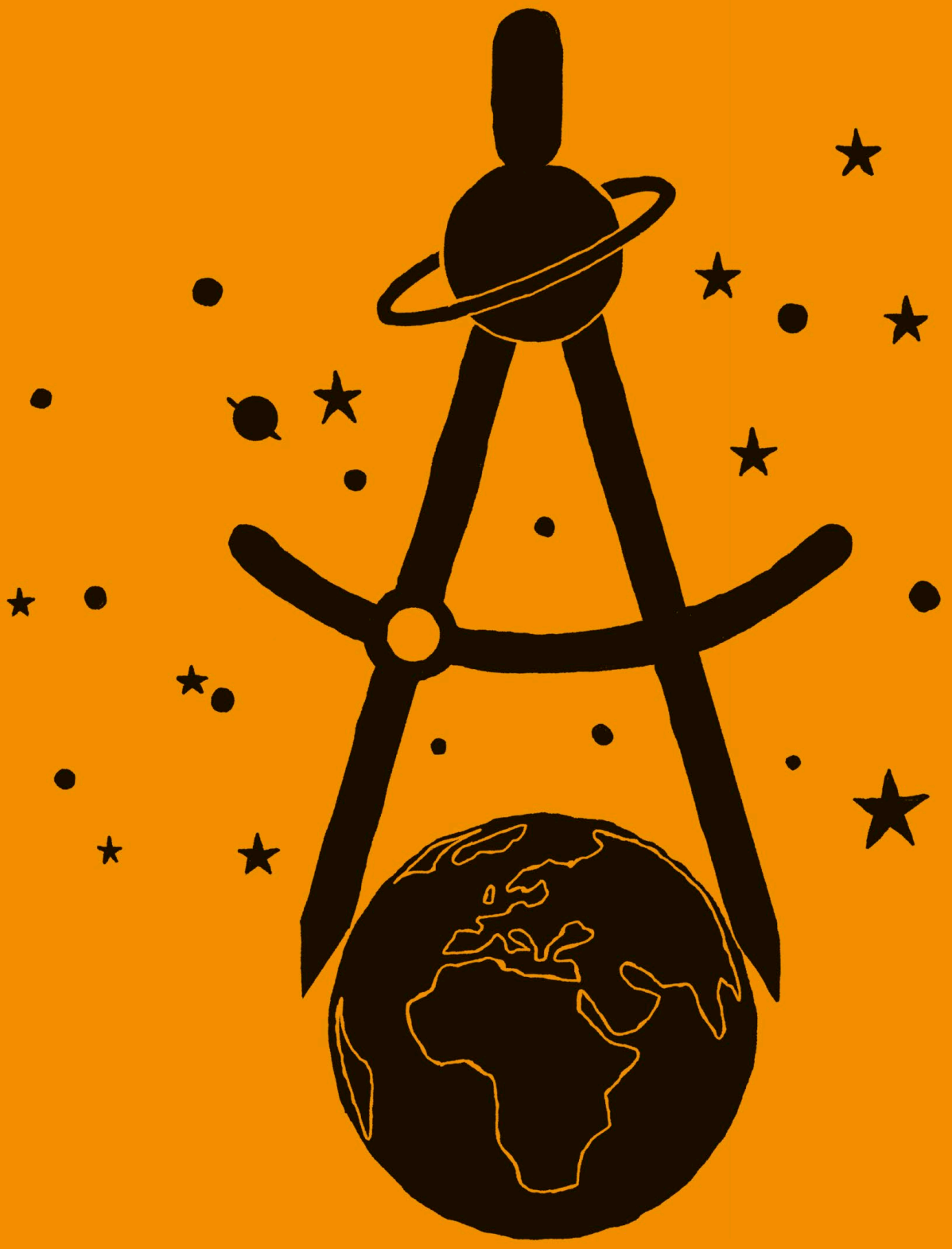
En 1766 se trasladó a Berlín, donde sucedió a Euler como director de matemáticas en la Academia de Ciencias. Allí produjo sus trabajos más importantes sobre mecánica analítica y abordó problemas astronómicos como el Relación gravitacional entre tres cuerpos. Se trasladó a París en 1786, donde pasó el resto de su carrera hasta su muerte en 1813.

Trabajos clave

1758–73 *Miscelánea Taurinensia*: artículos publicados por la Academia de Ciencias de Turín
1788–89 *Mecánica Analítica*

DEBEMOS BUSCAR LOS CIELOS POR LA MEDIDA DE LA TIERRA

UNIDADES SI Y CONSTANTES FÍSICAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Bryan Kibble
(1938-2016)

ANTES

1875 La Convención del Metro está acordada por 17 naciones.

1889 El internacional
Se construyen prototipos de Kilogramo y Metro.

1946 Se adoptan nuevas definiciones de amperios y ohmios.

DESPUÉS

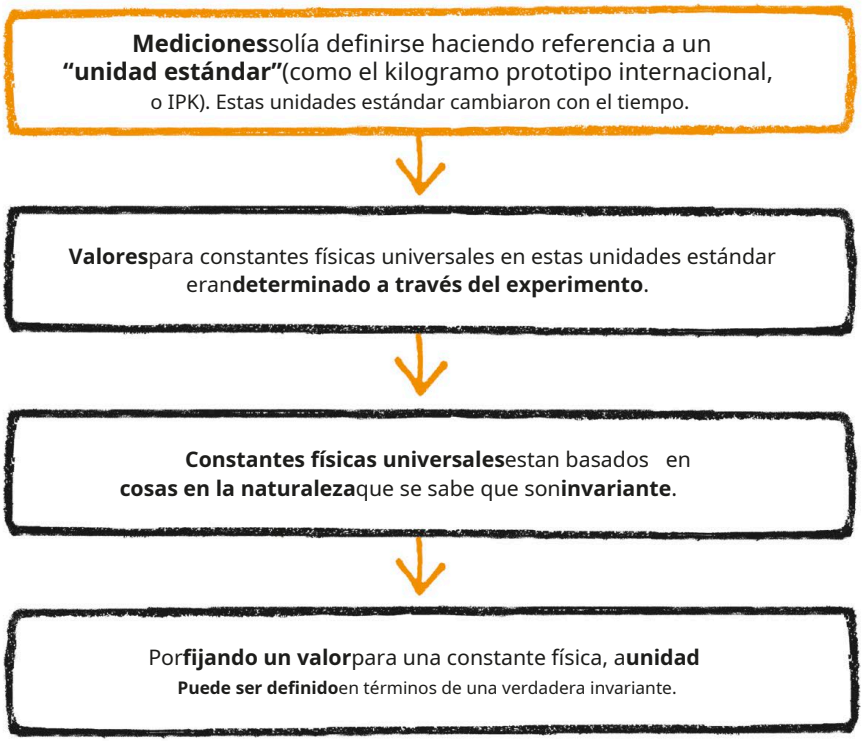
1967 El segundo se redefine en términos de frecuencias ligadas al átomo de cesio.

1983 El medidor se redefine en términos de*C*, la velocidad de la luz en el vacío.

1999 Se introduce una nueva unidad derivada del SI que mide la actividad catalítica, el katal.

2019 Todas las unidades básicas del SI se redefinen en términos de constantes físicas universales.

> Cada molécula, en todo el universo, lleva impresa en él el sello de una métrica sistema tan claramente como ¿El medidor de la Archivos en París.
>
> **James Clerk Maxwell**



METRO

La medición de una cantidad física requiere la especificación de una unidad (como el metro para la longitud), y comparar medidas requiere que cada parte defina la unidad exactamente de la misma manera. Aunque las unidades estándar habían sido desarrolladas por culturas antiguas, como la romana, el crecimiento del comercio internacional y la industrialización en los siglos XVII y XVIII hizo necesaria la uniformidad y imperativo de precisión.

El sistema métrico se introdujo en la década de 1790, durante la Revolución Francesa, para racionalizar las medidas, simplificar el comercio y unir a Francia. En ese momento, se utilizaban cientos de miles de unidades diferentes, que variaban de un pueblo a otro. La idea era reemplazarlos con estándares universales y permanentes de longitud, área, masa y volumen basados en naturaleza. El metro, por ejemplo, se definió como una fracción de la circunferencia de la Tierra a lo largo del meridiano de París. En 1799, se crearon los prototipos del metro de platino y del kilogramo de platino, y se enviaron copias para su exhibición en lugares públicos de toda Francia; el metro de longitud también fue grabado en piedra en sitios de París y otras ciudades.

Durante el siglo siguiente, otros países de Europa y algunos de América del Sur adoptaron el sistema métrico. En 1875, preocupados por el desgaste de los prototipos de platino existentes y su tendencia a deformarse, representantes de 30 países se reunieron en París con el objetivo de establecer un estándar global para las mediciones.

El tratado resultante, la Convención del Metro (Convention du Mètre), estipuló nuevos prototipos para el metro y el kilogramo, fabricados a partir de una aleación de platino e iridio. Estos

Ver también: Medición de distancia 18–19 · Tiempo de medición 38–39 El desarrollo de la mecánica estadística 104-111 · Carga eléctrica 124–127 La velocidad de la luz 275

se guardaron en París y se produjeron copias para los institutos nacionales de normalización de los 17 países signatarios. La Convención esbozaba procedimientos para que periódicamente calibrar los estándares nacionales con respecto a los nuevos prototipos, y también creó la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), o BIPM, para supervisarlos.

La versión SI (Système international, o Sistema Internacional) del sistema métrico, iniciada en 1948, fue aprobada por las naciones firmantes en París en 1960. Desde entonces, se ha utilizado para casi todas las mediciones científicas y tecnológicas y muchas mediciones cotidianas. Todavía hay excepciones, como las distancias de las carreteras en el Reino Unido y Estados Unidos, pero incluso las unidades imperiales británicas y las unidades tradicionales estadounidenses, como la yarda y la libra, se han definido en términos de estándares métricos.

Unidades de 10

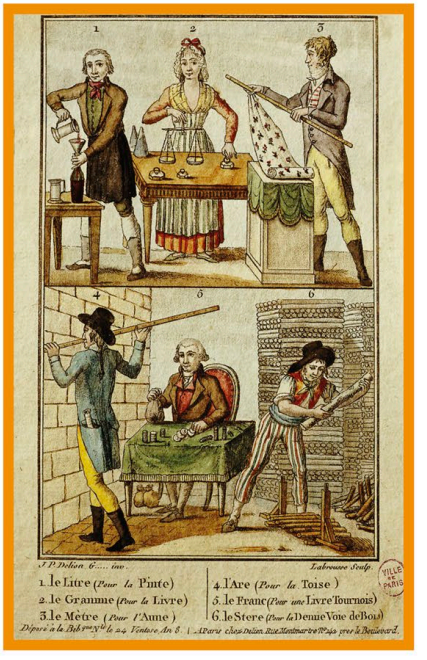
Con sistemas tradicionales de unidades que utilizan proporciones de 2, 3 y sus múltiplos (por ejemplo, 12 pulgadas) haz un pie: algunas sumas cotidianas son fáciles, pero la aritmética más complicada puede resultar difícil de manejar. El sistema métrico especifica sólo proporciones decimales (contando en unidades de 10), lo que hace que la aritmética sea mucho más fácil; está claro que 1/10 de 1/100 de un metro es 1/1000 de un metro.

El sistema métrico también especifica nombres de prefijos y abreviaturas para muchos múltiplos, como kilo- (k) para multiplicar por 1000, centi- (c) para una centésima y micro- (μ) para una millonésima.

Los prefijos permitidos por el SI van desde yocto- (y), que significa 10^{-24}, a yotta- (Y), que significa 10^{24}.

CGS, MKS y SI

En 1832, el matemático alemán Carl Gauss propuso un sistema de medición basado en tres unidades fundamentales de longitud, masa, y tiempo. La idea de Gauss era que todas las cantidades físicas podían medirse en estas unidades o combinaciones de ellas. Cada cantidad fundamental tendría una unidad, a diferencia de algunos sistemas tradicionales que usaban varias unidades diferentes para una cantidad (por ejemplo, --



El sistema metrico entró en uso en Francia alrededor de 1795. Este grabado de LF Labrousse muestra personas usando las nuevas unidades decimales para medir cosas e incluye una lista de unidades métricas, cada una seguida de la unidad que se reemplaza.

El IPK mide sólo 4 cm de altura y se conserva bajo tres campanas de vidrio en el BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) en París, Francia.

El IPK

Durante 130 años, el kilogramo estuvo definido por un cilindro de platino-iridio, el IPK (Kilogramo Prototipo Internacional) o "Le Grand K". Los institutos nacionales de metrología de todo el mundo, incluidos el NPL (Laboratorio Nacional de Física, Reino Unido) y el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, EE. UU.), conservaban copias del cilindro y las comparaban con el IPK aproximadamente una vez cada 40 años.

Aunque la aleación de platino-iridio es extremadamente estable, con el tiempo pueden aparecer discrepancias de hasta 50 μg. emergió entre los cilindros. Dado que otras unidades básicas dependían de la definición del kilogramo, esta deriva afectó a las mediciones de muchas cantidades. A medida que los científicos y la industria exigieron mayor precisión para los experimentos y la tecnología, la inestabilidad del IPK se convirtió en un problema grave.

En 1960, cuando el metro fue redefinido en términos de una longitud de onda particular de la luz emitida por un átomo de criptón, el kilogramo se convirtió en la única unidad básica cuyo estándar dependía de un objeto físico. Con la redefinición de SI en 2019, este ya no es el caso.

unidades básicas del SI

Hoy en día, las unidades básicas del SI se definen en términos de constantes físicas cuyos valores numéricos son fijos y, aparte del segundo y el mol, de definiciones de otras unidades básicas.

Tiempo	**Segundo (s)**	El segundo (s) se define fijando Δv_{Cs}, el frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio-133, que será 9 192 631 770 Hz (es decir, 9 192 631 770 s^{-1}).
Longitud	**Metro** (metro)	El metro (m) se define fijando c, la velocidad de la luz en el vacío, ser 299 792 458 ms^{-1}, donde el segundo se define en términos de Δv_{Cs}.
Masa	**Kilogramo (kg)**	El kilogramo (kg) se define fijando h, la constante de Planck, es 6,626 070 15 × 10^{-34} J s, (es decir, 6.626 070 15 × 10^{-34} $kg{\cdot}m^2s^{-1}$, donde el metro y el segundo se definen en términos de c y Δv_{Cs}).
Eléctrico actual	**Amperio (A)**	El amperio (A) se define fijando e, el elemento elemental cargo, será 1.602 176 634 × 10^{-19}C (es decir, 1,602 176 634 × 10^{-19}A s, donde el segundo se define en términos de Δv_{Cs}).
Termo-dinámica temperatura	**kélvin (K)**	El kelvin (K) se define fijando k, el Boltzmann constante, siendo 1.380 649 × 10^{-23} JK^{-1} (es decir, 1.380 649 × 10^{-23} $kg{\cdot}m^2s^{-2}k^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en términos de h, c y Δv_{Cs}).
Cantidad de sustancia	**Lunar (moles)**	El mol (mol) se define fijando N_A, la constante de Avogadro, es exactamente 6.022 140 76 × 10^{23} $moles^{-1}$ (es decir, un mol de una sustancia contiene 6,02214076 × 10^{23} partículas como átomos, moléculas o electrones).
Luminoso intensidad	**Candela (cd)**	La candela (cd) se define fijando K_{cd}, la eficacia luminosa de la radiación de frecuencia 540 × 10^{12} Hz, será 683 lm W^{-1} (es decir, 683 cd sr $kg^{-1}metro^{-2}s^3$, donde sr es el ángulo sólido en estereorradianes, y el kilogramo, el metro y el segundo se definen en términos de h, c, y Δv_{Cs}).

pulgada, yarda y furlong para la longitud). En 1873, los físicos británicos propusieron el centímetro, el gramo y el segundo (CGS) como unidades fundamentales. Este sistema CGS funcionó bien durante muchos años, pero poco a poco fue dando paso al sistema MKS (metro, kilogramo y segundo). Ambos fueron reemplazados por la SI, que

Incluyó unidades estandarizadas en áreas de estudio más nuevas, como la electricidad y el magnetismo.

Unidades SI básicas y derivadas

El SI especifica siete "unidades básicas" (y abreviaturas) para medir siete cantidades fundamentales, incluyendo el metro (m) para longitud, kilogramo (kg) para masa y segundo (s) para tiempo. Estas cantidades fundamentales se consideran independientes entre sí, aunque las definiciones de sus unidades no lo son; por ejemplo, la longitud y el tiempo son independientes, pero la definición del metro depende de la definición del segundo.

Otras cantidades se miden en "unidades derivadas", que son combinaciones de unidades básicas, según la relación entre las cantidades. Por ejemplo, la velocidad, que es la distancia por unidad de tiempo, se mide en metros por segundo (ms^{-1}). Además de estas unidades derivadas, actualmente existen 22 "unidades derivadas con nombres especiales", incluida la fuerza, que se mide en newtons (N), donde 1 N = 1 kg ms^{-2}.

Precisión cada vez mayor

A medida que la teoría y la tecnología han avanzado, las unidades básicas del SI se han redefinido. La metrología moderna (la ciencia de la medición) depende de instrumentos de gran precisión. El desarrollo de la balanza de vatios de bobina móvil por parte del metrólogo británico Bryan Kibble en 1975 aumentó considerablemente la precisión con la que se podía definir el amperio. El balance de vatios compara la potencia desarrollada por una masa en movimiento con la corriente y el voltaje en una bobina electromagnética.

Kibble colaboró con Ian Robinson en el Laboratorio Nacional de Física (NPL) del Reino Unido en 1978, creando un laboratorio práctico Instrumento, el Mark I, que permitió medir el amperio con una precisión sin precedentes. En 1990 le siguió la balanza Mark II. Construida en una cámara de vacío, este instrumento permitió medir la constante de Planck con suficiente precisión como para permitir la redefinición del kilogramo. Los modelos posteriores de la balanza de Kibble han contribuido significativamente a la versión más reciente del SI.

Históricamente, las definiciones se hacían en términos de artefactos físicos (como el IPK) o propiedades medidas (como la frecuencia de la radiación emitida por un tipo particular de átomo) e incluían una o más constantes físicas universales. Estas constantes (como c, la velocidad de la luz en el vacío, o Δv_{Cs}, una frecuencia asociada con un electrón que se mueve entre niveles de energía particulares (la "transición hiperfina") en un átomo de cesio)

> Es natural que el hombre relacione las unidades de distancia que recorre con las dimensiones de el globo que habita.
>
> **Pierre-Simon Laplace**
> **matemático francés y filósofo**

son invariantes naturales. En otras palabras, las constantes físicas universales son las mismas en todo el tiempo y el espacio, y por eso son más estables que cualquier determinación experimental de ellas o cualquier artefacto material.

Unidades SI redefinidas

La redefinición de 2019 de las unidades SI en términos de constantes físicas fundamentales fue un cambio filosófico. Antes de 2019, las definiciones de unidades eran explícitas. Por ejemplo, desde 1967, el segundo se había definido como 9 192 631 770 ciclos del Radiación emitida por la transición hiperfina de cesio. Este número se obtuvo experimentalmente, comparando ΔV_{Cs} existiendo la definición más rigurosa del segundo entonces, que se basaba en la órbita de la Tierra alrededor del sol. Hoy, la definición es sutilmente diferente.

La constante (en este caso, el valor de ΔV_{Cs}—se define explícitamente por primera vez (como 9 192 631 770). Esto expresa nuestra confianza en que ΔV_{Cs} nunca cambia. Realmente no importa qué valor numérico se le asigne porque el tamaño de la unidad en la que se mide es arbitrario. Sin embargo, existe una unidad conveniente: la segunda, que puede perfeccionarse, por lo que es se le asigna un valor que hace que el segundo recién definido sea lo más cercano posible al segundo según la definición anterior. En otras palabras, en lugar de tener una definición fija del segundo y medir ΔV_{Cs} en relación con él, los metrólogos fijan un número conveniente para ΔV_{Cs} y definir el segundo en relación con eso.

Según la antigua definición del kilogramo, el IPK se consideraba una constante. Según la nueva definición, el valor de la constante de Planck (6.626 070 15 - 10^{-34} julios-segundos)

La balanza de croquetas en NIST produce mediciones increíblemente precisas y ha contribuido a la reciente redefinición de todas las unidades de medición básicas en términos de constantes físicas.

es fijo y el kilogramo se ha redefinido para que se ajuste a este valor numérico.

La nueva SI tiene ahora una base más sólida para su redefinición de unidades. A efectos prácticos, la mayoría no ha cambiado, pero su estabilidad y precisión a escalas muy pequeñas o muy grandes ha mejorado notablemente.

Bryan Kibble

Nacido en 1938, el físico y metrólogo británico Bryan Kibble mostró una temprana aptitud para la ciencia y ganó una beca para estudiar en la Universidad de Oxford, donde obtuvo un doctorado en espectroscopia atómica en 1964. Después de un breve período posdoctoral en Canadá, Regresó al Reino Unido en 1967 y trabajó como investigador en el Instituto Nacional de Física. Laboratorio (NPL) hasta 1998.

Kibble hizo varias contribuciones importantes a la metrología a lo largo de su carrera, la mayor de las cuales fue el desarrollo de la balanza de vatios de bobina móvil, que permitió realizar mediciones (inicialmente del amperio) con gran precisión sin referencia a un artefacto físico. Después de su muerte en 2016, la balanza de vatios pasó a llamarse balanza Kibble en su honor.

Trabajos clave

1984 *Puentes de CA coaxiales* (con GH Raynor)
2011 *Circuitos eléctricos coaxiales para mediciones sin interferencias* (con Shakil Awan y Jürgen Schurr)

ENERGÍA Y MATE

materiales Y calor

urgencias

Los filósofos griegos Demócrito y Leucipo establecer la escuela de **atomismo**, creyendo que el mundo está hecho de **pequeño, indestructible fragmentos**.

SIGLO Vantes de Cristo

Isaac Newton sugiere eso**átomos**se llevan a cabo juntos por un **fuerza invisible de atracción**.

1704

James Watt crea un eficiente**vapor motor**, que resulta ser la fuerza motriz del**Industrial Revolución**.

1769

físico británico y inventor benjamín Thompson, Conde Rumford, proporciona una definición autorizada del**conservación de energía**.

1798

1678

erudito inglés Robert Hooke publica **ley de Hooke**, cual describe el camino objetos**deformar bajo tensión**.

1738

matemático suizo Daniel Bernoulli descubre que un**la presión del fluido disminuye** como su**velocidad aumenta**.

1787

Jacques Charles descubre la relación entre el **volumen de un gas y su temperatura en presión constante**, pero no publica su trabajo.

1802

Joseph-Louis Gay-Lussac redescubre el de Charles ley de los gases y también la **relación entre la temperatura de un gas y presión**.

Algunas cosas en nuestro universo son tangibles, cosas que podemos tocar y sostener en nuestras manos. Otros parecen etéreos e irreales hasta que observamos el efecto que tienen en los objetos que sostenemos. Nuestro universo está construido a partir de materia tangible pero se rige por el intercambio de energía intangible.

Materia es el nombre que se le da a cualquier cosa en la naturaleza que tenga figura, figura y masa. Los filósofos naturales de la antigua Grecia fueron los primeros en proponer que la materia estaba formada por muchos pequeños bloques de construcción llamados átomos. Los átomos se juntan para formar materiales, hechos de uno o más átomos diferentes combinados de diversas maneras. Estructuras microscópicas tan diferentes confieren a estos materiales propiedades muy diferentes, algunas elásticas y elásticas, otras duras y quebradizas.

Mucho antes de los griegos, los primeros humanos habían utilizado los materiales que los rodeaban para realizar la tarea deseada. De vez en cuando se descubría un nuevo material, la mayoría de las veces por accidente, pero a veces mediante experimentos de prueba y error. Al agregar coque (carbono) al hierro se produjo acero, un metal más fuerte pero más quebradizo que fabricaba mejores hojas que el hierro solo.

La era de la experimentación

En Europa durante el siglo XVII, la experimentación dio paso a leyes y teorías, y estas ideas condujeron a nuevos materiales y métodos. Durante la Revolución Industrial Europea (1760-1840), los ingenieros seleccionaron materiales para construir máquinas que pudieran soportar grandes fuerzas y temperaturas. Estas máquinas eran impulsados por agua en su forma gaseosa de vapor. El calor era la clave para crear vapor a partir del agua. En la década de 1760, los ingenieros escoceses Joseph Black y James Watt hicieron el importante descubrimiento de que el calor es una cantidad, mientras que la temperatura es una medida. Entendiendo cómo es el calor transferidos y cómo se mueven los fluidos se volvieron cruciales para el éxito en el mundo industrial, con ingenieros y físicos compitiendo para construir las mejores y más grandes máquinas.

Los experimentos con las propiedades físicas de los gases comenzaron con la creación de la bomba de vacío por Otto von Guericke en Alemania en 1650. Durante el siglo siguiente, los químicos Robert Boyle en Inglaterra y Jacques Charles y Joseph-Louis Gay-Lussac en Francia descubrieron tres leyes que relacionado

1803 — El químico británico John Dalton propone su moderno **modelo atómico** de la relación con ¿Qué determinada sustancia química elementos **se combinan para formar compuestos**.

1824 — Sadi Carnot analiza la eficiencias del vapor motores y desarrolla la idea de un proceso reversible, iniciando el **ciencia de termodinámica**.

1834 — El francés Émile Clapeyrón **combina las leyes de los gases** de Boyle, Charles, Gay-Lussac y Amadeo Avogadro en el **ecuación de los gases ideales**.

1844 — James Joule descubre que **calor es una forma de energía** y que otras formas de energía se puede convertir en calor.

1865 — físico alemán Rudolf Clausius presenta el moderno **definición de entropía**.

1873 — El holandés Johannes Diderik van der Waals propone su **ecuación de Estado** describir matemáticamente el comportamiento de los gases a medida que **condensar** a un líquido.

1874 — El ingeniero y físico irlandés William Thomson (más tarde Lord Kelvin) declara formalmente el **segunda ley de termodinámica**, cual eventualmente conduce a la termodinámica **flecha del tiempo**.

1900 — El físico alemán Max. Planck propone una nueva teoría para **cuerpo negro radiación**, y introduce la idea del **cuántico** de energía.

la temperatura, el volumen y la presión de un gas. En 1834, estas leyes se combinaron en una sola ecuación para mostrar simplemente la relación entre la presión, el volumen y la temperatura del gas.

Los experimentos realizados por el físico británico James Joule demostraron que el calor y el trabajo mecánico son formas intercambiables de la misma cosa que hoy llamamos energía. Los industriales deseaban trabajo mecánico a cambio de calor. Se quemaron grandes cantidades de combustibles fósiles, principalmente carbón, para hervir agua y generar vapor. El calor aumentó la energía interna del vapor antes de que se expandiera y realizara trabajo mecánico, empujando pistones y haciendo girar turbinas. La relación entre calor, energía y trabajo se estableció en la primera ley de la termodinámica.

Los físicos diseñaron nuevos motores térmicos para extraer la mayor cantidad de trabajo posible de hasta el último fragmento de calor. El francés Sadi Carnot descubrió la manera más eficiente de lograrlo teóricamente, poniendo un límite superior a la cantidad de trabajo. obtenible para cada unidad de calor intercambiada entre dos depósitos a diferentes temperaturas. Confirmó que el calor sólo pasaba espontáneamente del calor al frío. Se imaginaron máquinas que hacían lo contrario, pero estos refrigeradores no se construyeron hasta años después.

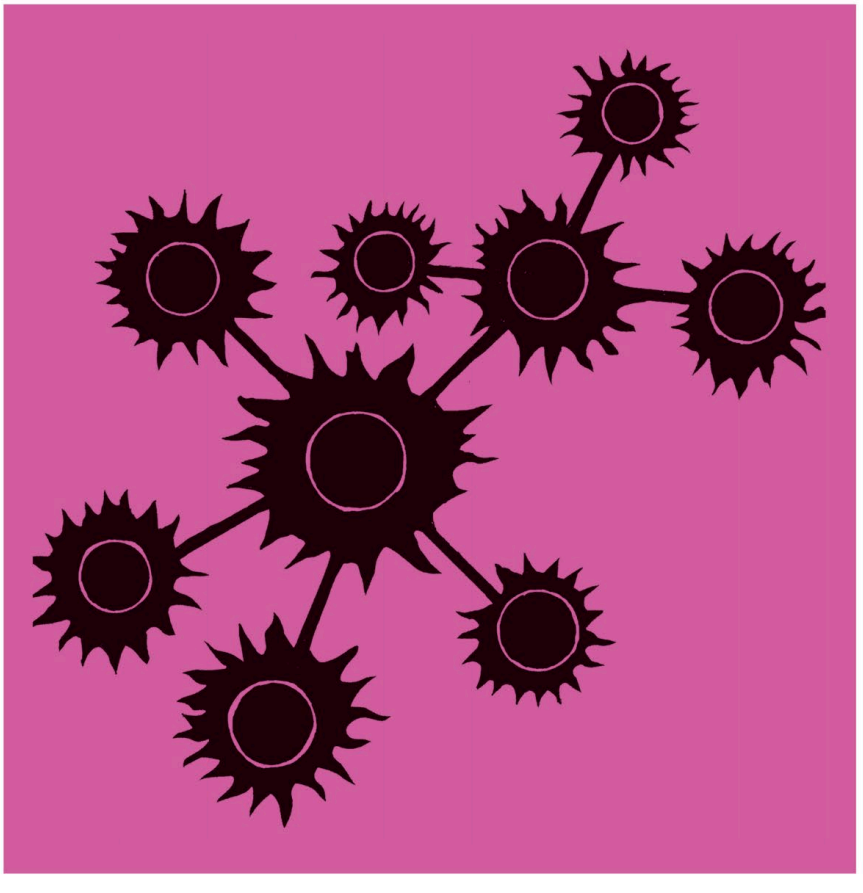
Entropía y teoría cinética. La dirección única de la transferencia de calor del calor al frío sugirió una ley subyacente de la naturaleza, y surgió la idea de la entropía. La entropía describe la cantidad de desorden que hay entre los elementos subyacentes.

partículas que forman un sistema. El calor que fluye únicamente del calor al frío fue un ejemplo especializado de la segunda ley de la termodinámica, que establece que la entropía y el desorden de un sistema aislado sólo pueden aumentar.

Las variables de temperatura, volumen, presión y entropía parecen ser sólo promedios de procesos microscópicos que involucran innumerables partículas. La transición de números microscópicos enormes a un número macroscópico singular se logró mediante la teoría cinética. Los físicos pudieron entonces modelar sistemas complejos de forma simplificada y vincular la energía cinética de las partículas de un gas con su temperatura. Comprender la materia en todos sus estados ha ayudado a los físicos a resolver algunos de los misterios más profundos del universo.

LA PRIMERA PRINCIPIOS DEL UNIVERSO

MODELOS DE MATERIA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE

Demócrito (C. 460–370 antes de Cristo)

ANTES

C.500 antes de Cristo En la antigua Grecia, Heráclito declara que todo está en estado de cambio.

DESPUÉS

C.300 antes de Cristo Epicuro añade el concepto de "viraje" atómico al atomismo, permitiendo que algunos comportamientos sean impredecibles.

1658 clérigo francés Pierre Gassendi *Sintagma filosofico* (*Tratado filosófico*), que intenta casar el atomismo con el cristianismo, se publica póstumamente.

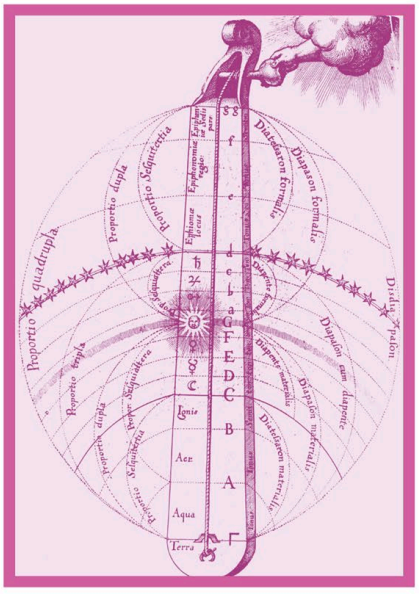
1661 El físico angloirlandés Robert Boyle define los elementos en *El químico escéptico*.

1803 John Dalton presenta su teoría atómica, basada en evidencia empírica.

Aentre los varios misterios que los eruditos han contemplado durante milenios es la cuestión de de qué está hecho todo. Los filósofos antiguos, desde Grecia hasta Japón, tendían a pensar que toda la materia estaba hecha de un conjunto limitado de sustancias simples ("elementos"), generalmente tierra, aire o viento, fuego y agua, que se combinaban en diferentes proporciones y disposiciones para crear todas las cosas materiales.

Diferentes culturas imaginaron estos sistemas de elementos de diferentes maneras, y algunas los vinculaban con deidades (como en la mitología babilónica) o los vinculaban a

Ver también: Cambios de estado y formación de bonos 100–103 · Teoría atómica 236-237 · El núcleo 240–241 Partículas subatómicas 242–243



El sistema clásicode elementos centrados en la tierra, el agua, el aire y el fuego. Esta ilustración, de un manuscrito fechado c. 1617, muestra estos elementos dentro de un universo divino.

marcos filosóficos más amplios (como la filosofía china de Wu Xing).

En el subcontinente indio, por ejemplo, ya en el siglo VIIIantes de Cristo, el sabio védico Aruni había descrito "partículas demasiado pequeñas para ser vistas [que] se agrupan formando las sustancias y objetos de la experiencia". Varios otros filósofos indios habían desarrollado de forma independiente sus propias teorías atómicas.

Un enfoque materialista

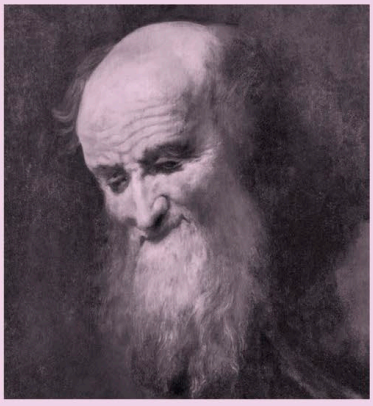
En el siglo Vantes de Cristo, el filósofo griego Demócrito y su maestro Leucipo también adoptaron un enfoque más materialista respecto de estos sistemas de elementos. Demócrito, que valoraba el razonamiento racional por encima de la sola observación, basó su teoría del atomismo sobre la idea de que debe ser imposible seguir dividiendo la materia eternamente. Sostuvo que, por lo tanto, toda la materia debe estar formada por partículas diminutas que son demasiado pequeñas para verlas. Llamó a estas partículas "átomos" de la palabra *átomos*, que significa incortable.

Según Demócrito, los átomos son infinitos y eternos. Las propiedades de un objeto dependen no sólo del tamaño y la forma de sus átomos sino también de cómo están ensamblados estos átomos. Afirmó que los objetos podrían cambiar con el tiempo mediante cambios en su disposición atómica. Por ejemplo, propuso que los alimentos amargos estuvieran hechos de átomos irregulares que desgarraban la lengua al masticarlos; Los alimentos dulces, por otro lado, consistían en átomos suaves que fluían suavemente.

sobre la lengua.

Si bien la teoría atómica moderna parece muy diferente de la teoría propuesta por Leucipo y Demócrito hace casi 2.500 años, su idea de que las propiedades de las sustancias se ven afectadas por la forma en que están dispuestos los átomos sigue siendo relevante hoy en día.

> Por convención dulce y por convención amargo, por convención caliente, por convención frío, por convención color; pero en realidad átomos y vacío.
>
> **Demócrito**



Demócrito

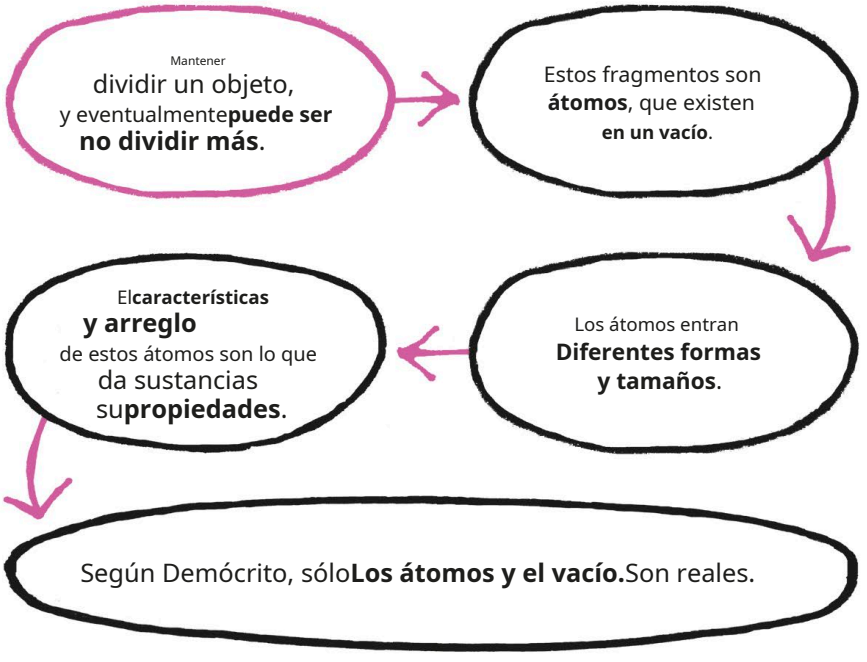
Demócrito nació en una familia adinerada en Abdera, en la histórica región de Tracia, en el sureste de Europa, alrededor del año 460.antes de Cristo. Viajó extensamente por partes de Asia occidental y Egipto cuando era joven antes de llegar a Grecia para familiarizarse con filosofía natural.

Demócrito reconoció a su maestro Leucipo como su mayor influencia, y los clasicistas a veces han tenido dificultades para distinguir entre sus contribuciones a la filosofía, sobre todo porque ninguna de las obras originales ha sobrevivido hasta el día de hoy.

Mejor conocido por formular el "atomismo", Demócrito también es reconocido como uno de los primeros pioneros en estética, geometría y epistemología. Creía que el razonamiento racional era una herramienta necesaria para buscar la verdad porque las observaciones realizadas a través de los sentidos humanos siempre serían subjetivas.

Demócrito era un hombre modesto y se dice que adoptó un enfoque humorístico hacia la erudición, lo que le dio su apodo: "El filósofo risueño". Él murió

alrededor de 370antes de Cristo.



Alrededor de 300antes de Cristo, el filósofo griego Epicuro refinó las ideas de Demócrito al proponer la noción de "viraje" atómico. Esta idea, de que los átomos pueden desviarse de sus acciones esperadas, introduce imprevisibilidad a escala atómica y permitió la preservación del "libre albedrío", una creencia fundamental de Epicuro. El viraje atómico podría verse como una antigua iteración de la incertidumbre en el núcleo de la mecánica cuántica: dado que todos los objetos tienen propiedades ondulatorias, es imposible medir con precisión su posición y su impulso al mismo tiempo.

El rechazo del atomismo

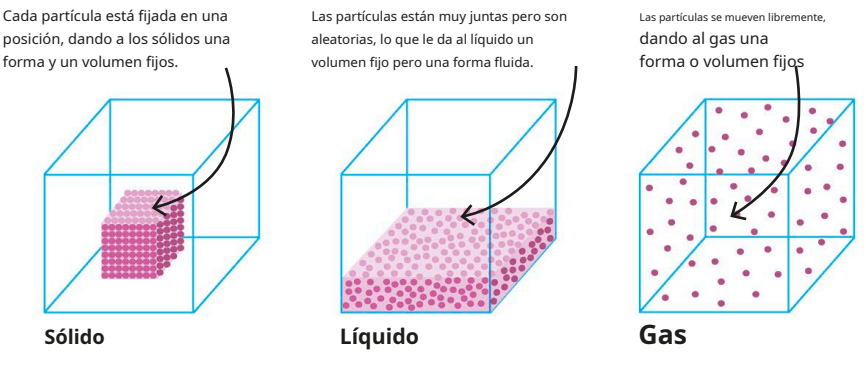
Algunos de los filósofos griegos más influyentes rechazaron el atomismo y, en cambio, respaldaron la teoría de cuatro o cinco elementos fundamentales. En la Atenas del siglo IV, Platón propuso que todo estaba compuesto por cinco sólidos geométricos (los sólidos platónicos), que daban a los tipos de materia su significado.

características. Por ejemplo, El fuego estaba formado por diminutos tetraedros que, con sus puntas y bordes afilados, lo hacían más móvil que la tierra, que estaba hecha de cubos estables y achaparrados. Aristóteles, alumno de Platón, que detestaba a Demócrito y supuestamente quería quemar sus obras, propuso que había cinco elementos (agregando el elemento celestial del "éter") y ninguna unidad básica de materia. aunque occidental Europa abandonó efectivamente el concepto de atomismo durante varios siglos; filósofos islámicos como Al-Ghazali (1058-1111) desarrollaron sus propias formas distintas de atomismo. Los filósofos budistas indios como Dhamakirti en el siglo VII describieron los átomos como explosiones puntuales de energía.

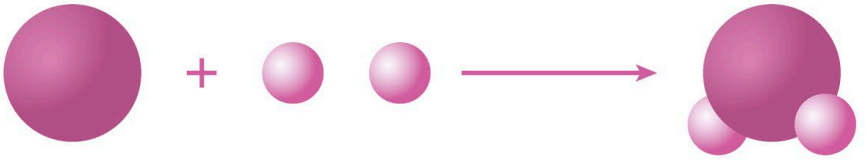
Renacimiento del atomismo

El nacimiento del Renacimiento en la Italia del siglo XIV revivió las artes, las ciencias y la política clásicas en toda Europa. También vio el renacimiento de la teoría del atomismo, tal como la habían descrito Leucipo y Demócrito. Sin embargo, el atomismo fue controvertido debido a su vínculo con el epicureísmo, que mucha gente creía que violaba las estrictas enseñanzas cristianas.

En el siglo XVII, el clérigo francés Pierre Gassendi se dedicó a conciliar el cristianismo con el epicureísmo, incluido el atomismo. Propuso una versión del atomismo epicúreo en la que los átomos tienen algunas de las características físicas de los objetos que forman, como la solidez y el peso. Lo más importante es que la teoría de Gassendi afirmaba que Dios había creado un número finito de



La teoría atómica de Dalton.propuso que los sólidos, líquidos y gases están formados por partículas (átomos o moléculas). El movimiento de las partículas y las distancias entre ellas varían.



átomo de oxígeno
16 unidades de masa

átomos de hidrógeno
1 unidad de masa cada uno

Molécula de agua
18 unidades de masa

John Dalton propuso que los átomos se combinanpara producir moléculas en proporciones simples de masa. Por ejemplo, dos átomos de hidrógeno (cada uno con una masa de 1) se combinan con uno de oxígeno (con una masa de 16) para crear una molécula de agua con una masa de 18.

átomos en el comienzo del universo, argumentando que todo podría estar formado por estos átomos y aún estar gobernado por Dios. Esta idea ayudó a que el atomismo regresara a la corriente principal entre los académicos europeos, con la ayuda del respaldo de Isaac Newton y Robert Boyle.

En 1661, Boyle publicó*El químico escéptico*, que rechazó la teoría de los cinco elementos de Aristóteles y, en cambio, definió los elementos como "cuerpos perfectamente separados". Según Boyle, muchos elementos diferentes, como el mercurio y el azufre, estaban formados por muchas partículas de diferentes formas y tamaños.

Cómo se combinan los elementos

En 1803, el físico británico John Dalton creó un modelo básico de cómo se combinan los átomos para formar estos elementos. Fue el primer modelo construido a partir de una base científica. A partir de sus experimentos, Dalton notó que los mismos pares de elementos, como el hidrógeno y el oxígeno, podían combinarse de diferentes maneras para formar diversos compuestos. Siempre lo hicieron con proporciones de masa de números enteros (ver diagrama arriba). Concluyó que cada elemento estaba compuesto por su propio átomo con masa única y otras propiedades. Según la teoría atómica de Dalton, los átomos no se pueden dividir, crear ni destruir, pero se pueden unir o separar de otros átomos para formar nuevas sustancias.

La teoría de Dalton fue confirmada en 1905, cuando Albert Einstein utilizó las matemáticas para explicar el fenómeno del movimiento browniano (el movimiento de diminutos granos de polen en el agua) utilizando la teoría atómica. Según Einstein, el polen es bombardeado constantemente por el movimiento aleatorio de muchos átomos. Las disputas sobre este modelo se resolvieron en 1911, cuando los franceses

El físico Jean Perrin comprobó que los átomos eran los responsables del movimiento browniano. El concepto de que los átomos están unidos o separados de otros átomos para formar sustancias diferentes es simple, pero sigue siendo útil para comprender fenómenos cotidianos, como cómo los átomos de hierro y oxígeno se combinan para formar óxido.

Estados de materia

Platón enseñó que la consistencia de las sustancias dependía de las formas geométricas de las que estaban hechas, pero la teoría atómica de Dalton explica con mayor precisión los estados de la materia. Como se ilustra al lado, los átomos de los sólidos están muy juntos, lo que les da una forma y un tamaño estables; Los átomos en los líquidos están débilmente conectados, lo que les da formas indefinidas pero en su mayoría estables. tamaño; y los átomos de los gases son móviles y están distantes entre sí, lo que da como resultado una sustancia sin forma ni volumen fijos.

El átomo es divisible.

Los átomos son el objeto ordinario más pequeño que tiene las propiedades de un elemento. Sin embargo, ya no se consideran indivisibles. En los dos siglos transcurridos desde que Dalton construyó la teoría atómica moderna, ésta ha sido adaptada para explicar nuevos descubrimientos. Por ejemplo, el plasma (el cuarto estado básico de la materia después de los sólidos, líquidos y gases) sólo puede ser completamente

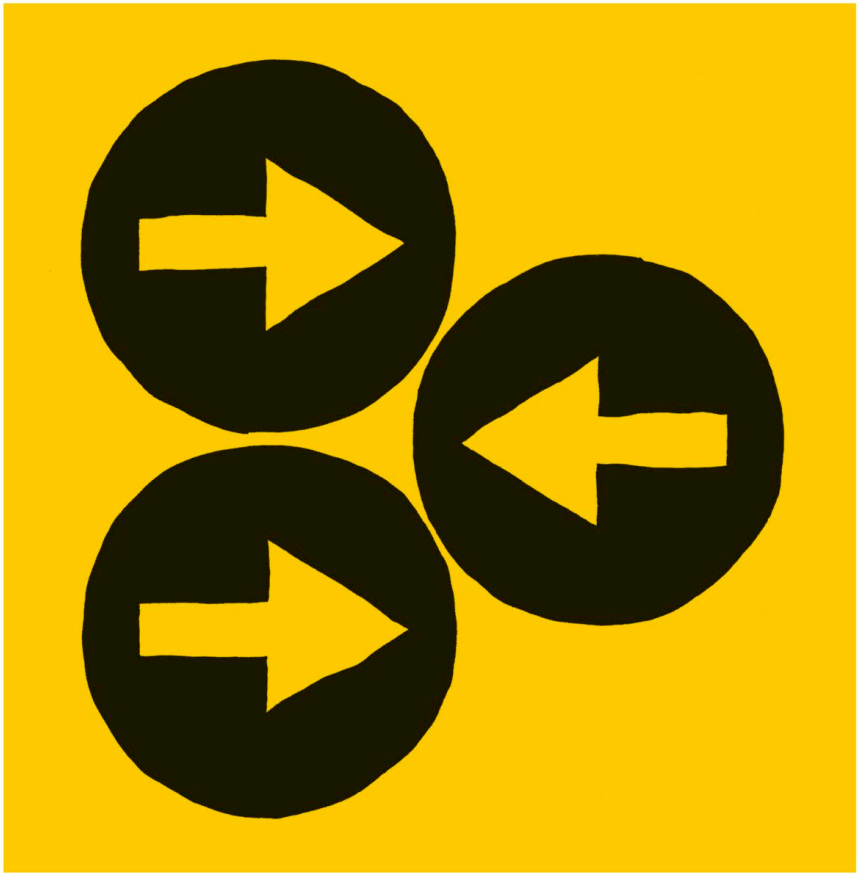
Se explica si los átomos se pueden dividir más. El plasma se crea cuando los electrones se deslocalizan (se quitan) de sus átomos.

A finales del siglo XIX y principios del XX, los científicos descubrieron que los átomos están formados por varias partículas subatómicas: electrones, protones y neutrones; y esos neutrones y protones están compuestos de partículas subatómicas aún más pequeñas. Este modelo más complejo ha permitido a los físicos comprender fenómenos que Demócrito y Dalton nunca podrían haber imaginado, como la desintegración beta radiactiva y la aniquilación de materia-antimateria.

> [Epicuro] supone que no sólo todos los cuerpos mixtos, sino todos los demás, son producido por las diversas y casuales ocurrencias de los átomos, moviéndose de un lado a otro... en el... vacío infinito.
>
> **Robert Boyle**

COMO EL EXTENSIÓN, ENTONCES EL FUERZA

ESTIRAR Y APRETAR



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Robert Hooke(1635-1703),
Tomás joven(1773–1829)

ANTES
1638 Galileo Galilei explora la flexión de vigas de madera.

DESPUÉS
1822 El matemático francés Augustin-Louis Cauchy muestra cómo se mueven las ondas de tensión a través de un material elástico.

1826 Claude-Louis Navier, un ingeniero y físico francés, desarrolla el módulo de Young en su forma moderna, el modulos elasticos.

1829 El minero alemán Wilhelm Albert demuestra fatiga del metal (debilitamiento del metal debido a la tensión).

1864 El físico francés Jean Claude St-Venant y el físico alemán Gustav Kirchhoff descubren materiales hiperelásticos.

El físico y erudito británico Robert Hooke hizo muchas contribuciones cruciales en la Revolución Científica del siglo XVII, pero se interesó por los resortes en la década de 1660 porque quería hacer un reloj. Hasta entonces, los relojes eran típicamente accionados por péndulo, y los relojes de péndulo se volvían erráticos cuando se usaban en los barcos. Si Hooke pudiera crear un reloj impulsado por un resorte y no por un péndulo, podría hacer un reloj que pudiera mantener el tiempo en el mar, resolviendo así el problema de navegación clave de la época: calcular la longitud de un barco (distancia este-oeste) requería precisión. cronometraje. Usando un resorte

Ver también: Presión 36 · Tiempo de medición 38–39 Leyes del movimiento 40–45 · Energía cinética y energía potencial 54 Las leyes de los gases 82–85

El metal enrollado como un resorte helicoidal puede ser **estirado y apretó**.

colgando un **peso** en un El resorte helicoidal lo hace **crecer más**.

la cantidad la **primavera crece** ya varía directamente con el **peso**.

El **extensión** de un el material elástico es **proporcional a la fuerza** estirándolo.

Como la extensión, así es la fuerza.

El péndulo también significó que Hooke podía hacer un reloj lo suficientemente pequeño como para guardarlo en un bolsillo.

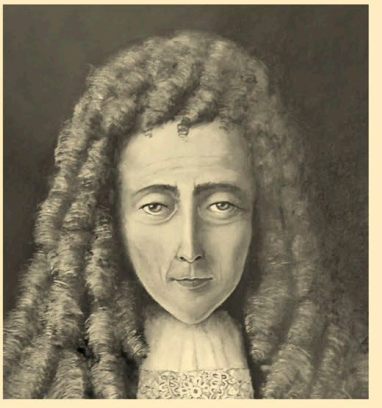
Fuerza de la primavera

En la década de 1670, Hooke escuchó que el científico holandés Christiaan Huygens también estaba desarrollando un reloj accionado por resorte. Ansioso por no ser derrotado, Hooke se puso a trabajar con el maestro relojero Thomas Tompion para fabricar su reloj.

Mientras Hooke trabajaba con Tompion, se dio cuenta de que un resorte helicoidal debe desenrollarse a un ritmo constante para mantener el tiempo. Hooke experimentó estirando y apretando resortes y descubrió la sencilla relación plasmada en la ley de elasticidad que más tarde recibió su nombre. La ley de Hooke dice que la cantidad que se aprieta o se estira un resorte es precisamente proporcional a la fuerza aplicada. Si aplicas el doble de fuerza, se estira el doble. La relación puede ser resumido en una ecuación simple, $F=kx$, en el cual F es la fuerza, X es la distancia estirada, y k es una constante (un valor fijo). Esta sencilla ley resultó ser una plataforma clave para comprender cómo se comportan los sólidos.

Hooke escribió su idea como un anagrama latino, *ceiiinosssttvu*, una forma común para que los científicos de la época mantuvieran su trabajo en secreto hasta que estuvieran listos para publicarlo.

> El libro más ingenioso.
> alguna vez leí en mi vida.
> **Samuel Pepys**
> **cronista inglés,**
> **en el libro de Hooke *micrografía***



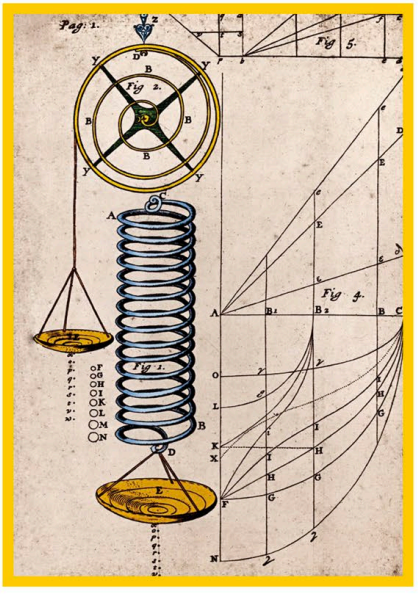
Robert Hooke

Nacido en la Isla de Wight en 1635, Robert Hooke se abrió camino en la Universidad de Oxford, donde desarrolló una pasión por la ciencia. En 1661, la Royal Society debatió un artículo sobre el fenómeno de la subida del agua en delgadas tuberías de vidrio; La explicación de Hooke fue publicada en una revista. Cinco años más tarde, la Royal Society contrató a Hooke como curador de experimentos.

La variedad de logros científicos de Hooke es enorme. Entre sus muchos inventos se encuentran la trompeta y el nivel de burbuja. También fundó la ciencia de la meteorología, fue el gran pionero de los estudios microscópicos (descubrió que los seres vivos están hechos de células) y desarrolló la ley clave sobre la elasticidad, conocida como ley de Hooke. También colaboró con Robert Boyle en las leyes de los gases y con Isaac Newton en las leyes de la gravedad.

Trabajos clave

1665 *micrografía*
1678 "De primavera" **1679**
Colección de conferencias



Balanza de resorte de Hooke Usó el estiramiento de un resorte para mostrar el peso de algo. Hooke utilizó esta ilustración para explicar el concepto en su conferencia "De la primavera".

Descifrado, se lee el anagrama *Ut tensio sic vis*, que significa "como la extensión, así es la fuerza"; es decir, la extensión es proporcional a la fuerza. Una vez fabricado el reloj, Hooke publicó sus ideas sobre los resortes dos años más tarde, en su folleto de 1678 "de Potentia Restitutiva" ("De la primavera"). Comenzó esbozando una demostración sencilla para que la gente la probara en casa: torcer el alambre hasta formar una bobina y luego colgar diferentes pesos para ver hasta dónde se estira la bobina. Había inventado la balanza de resorte.

Sin embargo, el artículo de Hooke tuvo una importancia duradera. No sólo fue una simple observación de cómo se comportaban los resortes, sino que también proporcionó una visión clave sobre la resistencia de los materiales y el comportamiento de los sólidos bajo tensión, factores que son fundamentales para la ingeniería moderna.

Mini resortes

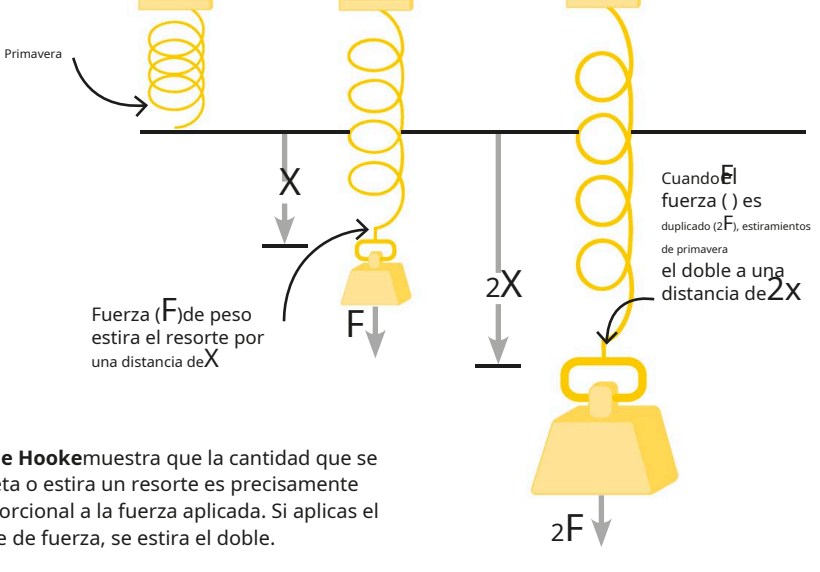
Al tratar de encontrar una explicación para el comportamiento de los resortes, Hooke sospechó que estaba ligado a una propiedad fundamental de la materia. Especuló que los sólidos estaban hechos de partículas vibrantes que chocaban constantemente entre sí (anticipándose a la teoría cinética de los gases en más de 160 años). Sugirió que al exprimir un sólido se acercaban las partículas y aumentaban las colisiones, haciéndolo más resistente; estirarlo redujo las colisiones, de modo que el sólido se volvió menos capaz de resistir la presión del aire a su alrededor.

Existen claros paralelismos entre la ley de Hooke, publicada en 1678, y la ley de Boyle (1662) sobre la presión del gas, que Robert Boyle llamó "el resorte del aire". Además, la visión de Hooke sobre el papel de las partículas invisibles en la resistencia y elasticidad de los materiales parece notablemente cercana a nuestra comprensión moderna. Ahora sabemos que la resistencia y la elasticidad dependen de la estructura molecular y de los enlaces de un material. Los metales son enormemente resistentes, por ejemplo, debido a sus especiales enlaces metálicos entre sus átomos. Aunque los científicos no entenderían esto hasta dentro de 200 años, los ingenieros de la Revolución Industrial pronto se dieron cuenta de los beneficios de la ley de Hooke cuando comenzaron a construir puentes y otras estructuras con hierro en el siglo XVIII.

Matemáticas de ingeniería

En 1694, el matemático suizo Jacob Bernoulli aplicó la frase "fuerza por unidad de área" a la fuerza deformante: la fuerza de estiramiento o compresión. La fuerza por unidad de área pasó a denominarse "estrés" y la cantidad de estiramiento o compresión del material pasó a denominarse "deformación". La relación directa entre tensión y deformación varía; por ejemplo, algunos materiales se deformarán mucho más bajo una determinada tensión que otros. En 1727, otro matemático suizo, Leonhard Euler, formuló esta variación de tensión y deformación en diferentes materiales como el coeficiente (un número por el que se multiplica otro número) "mi", y la ecuación de Hooke quedó - =mi-, en el cual

-es el estrés y - es la tensión.



ley de Hookemuestra que la cantidad que se aprieta o estira un resorte es precisamente proporcional a la fuerza aplicada. Si aplicas el doble de fuerza, se estira el doble.

Resistencia a la tracción

Cuando los materiales se estiran más allá de su límite elástico, no volverán a su tamaño original, incluso cuando se elimine la tensión. Si se estiran aún más, eventualmente pueden romperse. La tensión máxima que puede soportar un material al tensarse durante más tiempo, antes de que se rompa, se conoce como resistencia a la tracción y es crucial para decidir la idoneidad de un material para una tarea particular.

Algunas de las primeras pruebas de resistencia a la tracción fueron realizadas por Leonardo da Vinci, quien escribió en 1500 sobre "Prueba de la resistencia de alambres de hierro de varias longitudes". Ahora sabemos que el acero estructural tiene una alta resistencia a la tracción de más de 400 MPa (megapascales).

Un pascal es la unidad de medida de la presión: 1Pa se define como 1N (newton) por metro cuadrado. Los pascales llevan el nombre del matemático y físico Blaise Pascal.

El acero estructural se utiliza a menudo en los puentes colgantes actuales, como el puente George Washington en Nueva Jersey (ver a la izquierda). Los nanotubos de carbono pueden ser cien veces más resistentes que el acero estructural (63.000 MPa).

medida de young

Durante experimentos llevados a cabo en 1782, el científico italiano Giordano Riccati descubrió que el acero era aproximadamente dos veces más resistente al estiramiento y a la compresión que el latón. Los experimentos de Riccati fueron muy similares en concepto al trabajo de Euler y también, 25 años después, al trabajo de Thomas Young.

Young era, como Robert Hooke, un erudito británico. Se ganaba la vida como médico, pero sus logros científicos fueron muy variados y su trabajo sobre el estrés y la deformación de los materiales fue una piedra angular de la ingeniería del siglo XIX.

En 1807, Young reveló la propiedad mecánica que era el coeficiente de Euler "mi". En su notable serie de conferencias, durante el mismo año, titulada "Filosofía natural y artes mecánicas", Young introdujo el concepto de "módulo" o medida para describir la elasticidad de un material.

Estrés y tensión

Young estaba interesado en lo que llamó la "resistencia pasiva" de un material, es decir, la elasticidad, y probó la fuerza de varios materiales para derivar sus medidas. El módulo de Young es una medida de la capacidad de un material elegido para resistir el estiramiento o la compresión en una dirección. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación. Un material como el caucho tiene un módulo de Young bajo (menos de 0,1 Pa (pascales), por lo que se estirará mucho con muy poca tensión. La fibra de carbono tiene un módulo de alrededor de 40 Pa, lo que significa que es 400 veces o más resistente al estiramiento que el caucho.

Límite elástico

Young se dio cuenta de que la relación lineal (en la que una cantidad aumenta directamente proporcionalmente a otra) entre la tensión y la deformación de un material funciona en un rango limitado. Esto varía entre materiales, pero en cualquier material sometido a demasiada tensión, se produce una tensión no lineal (desproporcionada).

eventualmente se desarrollará una relación entre estrés y tensión. Si la tensión continúa, el material alcanzará su límite elástico (el punto en el que deja de volver a su longitud original después de que se elimina la tensión). El módulo de Young sólo se aplica cuando la relación entre la tensión y la deformación de un material es lineal. Las contribuciones de Young sobre la resistencia de los materiales y también su resistencia al estrés fueron de gran valor para los ingenieros. El módulo de Young y sus ecuaciones abrieron la puerta al desarrollo de toda una serie de sistemas de cálculo que permiten a los ingenieros calcular las tensiones y deformaciones en las estructuras propuestas precisamente antes de construirlas. Estos sistemas de cálculo son fundamentales para construir desde coches deportivos hasta puentes colgantes. Los colapsos totales de estas estructuras son raros.

> Una alteración permanente de forma limita la fuerza de materiales con respecto a fines prácticos.
> **Tomás joven**

EL MINUTO

PARTES DE

EL ASUNTO ESTÁ EN

MOVIMIENTO RÁPIDO

FLUIDOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Daniel Bernoulli(1700-1782)

ANTES
1647 Blaise Pascal define la transmisión del cambio de presión en un fluido estático.

1687isaac newton
explica la viscosidad de un fluido en*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*).

DESPUÉS
1757 Influenciado por Bernoulli, Leonhard Euler escribe sobre mecánica de fluidos.

1859 James Clerk Maxwell explica las cualidades macroscópicas de los gases.

1918ingeniero alemán
Reinhold Platz diseña el perfil aerodinámico del avión Fokker D.VII para producir una mayor sustentación.

A El fluido se define como una fase de la materia que no tiene forma fija, cede fácilmente a la presión externa, se deforma según la forma de su recipiente y fluye de un punto a otro. Los líquidos y gases se encuentran entre los tipos más comunes. Todos los fluidos se pueden comprimir hasta cierto punto, pero se requiere una gran presión para comprimir un líquido en solo una pequeña cantidad. Los gases se comprimen más fácilmente ya que hay más espacio entre sus átomos y moléculas.

Uno de los mayores contribuyentes al campo de la dinámica de fluidos (el estudio de cómo las fuerzas afectan el movimiento de los fluidos) fue el matemático y físico suizo Daniel Bernoulli.

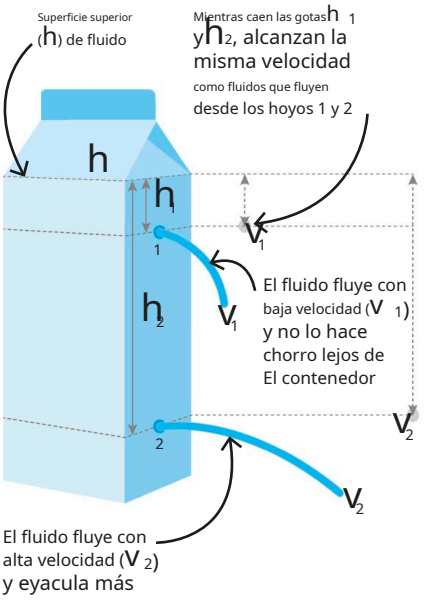
Ver también: Presión 36 · Leyes del movimiento 40–45 Energía cinética y potencial. energía 54 · Las leyes de los gases 82–85 El desarrollo de la mecánica estadística 104-111

cuyo 1738 *hidrodinámica* (*Hidrodinámica*) sentó las bases de la teoría cinética de los gases. Su principio establece que un aumento en la velocidad de movimiento de un fluido ocurre simultáneamente con una reducción en su presión o energía potencial.

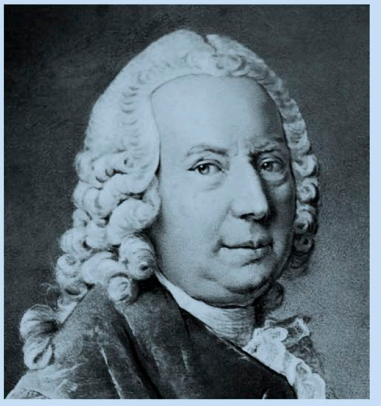
De bañeras a barriles

El principio de Bernoulli se basó en los descubrimientos de científicos anteriores. El primer trabajo importante sobre fluidos fue *Sobre cuerpos flotantes* por el antiguo filósofo griego Arquímedes. Este siglo III antes de Cristo El texto afirma que un cuerpo sumergido en un líquido recibe una fuerza de flotación igual al peso del fluido que desplaza, hecho del que se dice que Arquímedes se dio cuenta al bañarse, lo que dio lugar al famoso grito *"¡Eureka!"* ("¡Lo encontré!").

Siglos más tarde, en 1643, el matemático e inventor italiano Evangelista Torricelli formuló la ley de Torricelli. Este principio de dinámica de fluidos explica que la velocidad del flujo (v) de un fluido que deja un agujero en un recipiente, donde h es la profundidad del fluido sobre el agujero, es la misma que la velocidad que adquiriría una gota de fluido al caer libremente desde una altura h. si h aumenta, también lo hace la velocidad de la gota que cae y el fluido que sale del agujero. La velocidad a la que el fluido sale del agujero es proporcional a la altura del fluido sobre el agujero. Entonces, $v = -2gh$ dónde gramo es la aceleración debida a la gravedad.



Bajo la ley de Torricelli, chorros de líquido de los orificios 1 y 2, colocados a una profundidad de h_1 y h_2 desde la parte superior del fluido en un recipiente. Como h aumenta, la velocidad del fluido también aumenta. Lo mismo se aplica a las gotas en caída libre.



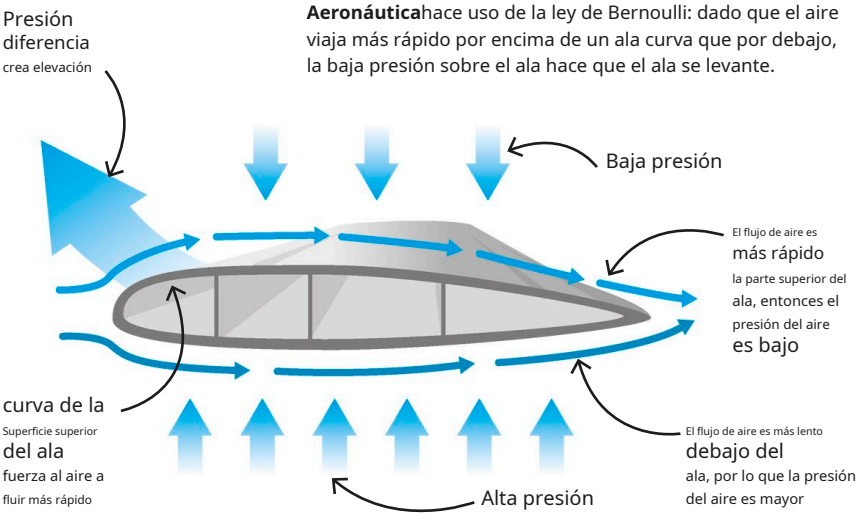
Daniel Bernoulli

Nacido en 1700 en Groningen (Países Bajos) en una familia de destacados matemáticos, Bernoulli estudió medicina en la Universidad de Basilea en Suiza, la Universidad de Heidelberg en Alemania y la Universidad de Estrasburgo (en ese momento también en Alemania). Obtuvo un doctorado en anatomía y botánica en 1721.

El artículo de Bernoulli de 1724 sobre ecuaciones diferenciales y la física del agua corriente le valió un puesto en la Academia de Ciencias de San Petersburgo, Rusia, donde enseñó y produjo importantes matemáticas. trabajar. *hidrodinámica* fue publicado tras su regreso a la Universidad de Basilea. Trabajó con Leonhard Euler sobre el flujo de fluidos, especialmente la sangre en el sistema circulatorio. sistema, y también trabajó en la conservación de energía en fluidos. Fue elegido miembro de la Royal Society de Londres en 1750 y murió en 1782 en Basilea, Suiza, a la edad de 82 años.

Obra clave

1738 *hidrodinámica* (*Hidrodinámica*)



Aeronáuticahace uso de la ley de Bernoulli: dado que el aire viaja más rápido por encima de un ala curva que por debajo, la baja presión sobre el ala hace que el ala se levante.

Otro gran avance se produjo en 1647, cuando el científico francés Blaise Pascal demostró que, para un fluido incompresible dentro de un recipiente, cualquier cambio de presión se transmite por igual a todas las partes de ese fluido. Este es el principio detrás de la prensa hidráulica y el gato hidráulico.

Pascal también demostró que la presión hidrostática (la presión de un fluido debida a la fuerza de gravedad) no depende del peso del fluido sobre él, sino de la altura entre ese punto y la parte superior del líquido. En el famoso (aunque apócrifo) experimento del barril de Pascal, se dice que insertó un tubo largo y estrecho lleno de agua en un barril lleno de agua. Cuando la tubería se elevó por encima del cañón, el aumento de presión hidrostática hizo estallar el cañón.

Viscosidad y flujo

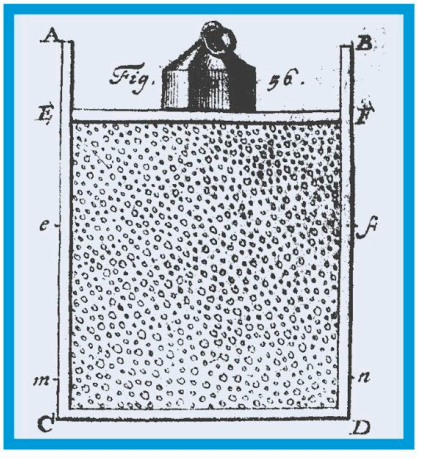
En la década de 1680, Isaac Newton estudió la viscosidad de los fluidos: la facilidad con la que fluyen. Casi todos los fluidos son viscosos y ejercen cierta resistencia a deformación. La viscosidad es una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir: los fluidos con baja viscosidad poseen baja resistencia y flujo. fácilmente, mientras que los fluidos de alta viscosidad resisten la deformación y no fluyen fácilmente. Según la ley de viscosidad de Newton, la viscosidad de un fluido es su "esfuerzo cortante" dividido por su "velocidad de corte". Si bien no todos los líquidos siguen esta ley, los que sí la siguen se denominan líquidos newtonianos. El esfuerzo cortante y la velocidad se pueden representar como un fluido intercalado entre dos placas. Uno está fijo debajo del fluido y el otro se desplaza lentamente sobre la superficie del fluido. El fluido está sujeto a un esfuerzo cortante (la fuerza que mueve la placa superior, dividida por el área de la placa). La velocidad de corte es la velocidad de la placa en movimiento dividida por la distancia entre las placas.

Estudios posteriores demostraron que también existen diferentes tipos de flujo de fluidos. Un flujo se describe como "turbulento" cuando presenta recirculación, remolinos y aparente aleatoriedad. Los flujos que carecen de estas características se describen como "laminares".

ley de Bernoulli

Bernoulli estudió la presión, la densidad y la velocidad en fluidos estáticos y en movimiento. Estaba familiarizado tanto con la teoría de Newton*Principios*y con roberto Boyle descubrió que la presión de una determinada masa de gas, a temperatura constante, aumenta a medida que disminuye el volumen del recipiente que la contiene. Bernoulli argumentó que los gases están formados por una gran cantidad de moléculas que se mueven aleatoriamente en todas direcciones y que su impacto sobre una superficie provoca presión. Escribió que lo que se experimenta como calor es la energía cinética de su movimiento y que, dado el movimiento aleatorio de las moléculas, el movimiento y la presión aumentan a medida que aumentan las temperaturas.

Al sacar estas conclusiones, Bernoulli sentó las bases de la teoría cinética de los gases. No fue ampliamente aceptado en el momento de su publicación en 1738, ya que el principio de conservación de la energía no sería probado hasta dentro de un siglo. Bernoulli descubrió que a medida que los fluidos fluyen más rápidamente, producen menos presión y, a la inversa, cuando los fluidos fluyen más lentamente, producen mayor presión. Esto se conoció como ley de Bernoulli, que ahora tiene muchas aplicaciones, como la sustentación generada por el flujo de aire en la aeronáutica.



Un diagrama en Bernoulli. *hidrodinámica*
Representa moléculas de aire que chocan con las paredes de un recipiente, creando suficiente presión para soportar un peso que descansa sobre una superficie móvil.

> Naturaleza siempre
> tiende a actuar en el
> formas más simples.
> **Daniel Bernoulli**

Teoría cinética

Mientras Bernoulli y otros científicos sentaban las bases de la teoría cinética de los gases, el científico escocés James Clerk Maxwell intentaba cuantificar la naturaleza del movimiento molecular en su interior. Explicó las cualidades macroscópicas de los gases: su presión, temperatura,
viscosidad y conductividad térmica. Maxwell desarrolló junto con el físico austriaco Ludwig Boltzmann un método estadístico para describir esta teoría.

A mediados del siglo XIX, la mayoría de los científicos asumían que todas las moléculas de gas viajaban a la misma velocidad, pero Maxwell no estaba de acuerdo. En su artículo de 1859 "Ilustración de la teoría dinámica de los gases", produjo un ecuación para describir una curva de distribución, ahora conocida como distribución de Maxwell-Boltzmann, que mostraba el rango de diferentes velocidades de las moléculas de gas. También calculó el camino libre medio (la distancia promedio recorrida por las moléculas de gas entre colisiones) y el número de colisiones a una temperatura determinada, y descubrió que cuanto mayor es la temperatura, más rápido es el movimiento molecular y mayor es el número de colisiones. Concluyó que la temperatura de un gas es una medida de su energía cinética media. Maxwell también confirmó la ley del científico italiano Amedeo Avogadro de 1811, que establece que volúmenes iguales de dos gases, a temperaturas y presiones iguales, contienen el mismo número de moléculas.

Descubrimientos superfluidos

Los hallazgos del siglo XX revelaron cómo se comportan los fluidos a temperaturas muy frías. En 1938, los físicos canadienses John F. Allen y Don Misener y el físico ruso Pyotr Kapitsa descubrieron que un isótopo de helio se comportaba de manera extraña cuando se enfriaba a una temperatura

Temperatura cercana al cero absoluto. Por debajo de su punto de ebullición de – 452,1 °F (–268,94 °C) se comporta como un líquido incoloro normal, pero por debajo de – 455,75 °F (–270,97 °C), se comporta

> A medida que los átomos se enfrían,
> empezar a acumularse en lo más bajo
> posible estado energético.
> **lena hau**
> **Físico danés, sobre superfluidos**

exhibió viscosidad cero, fluyendo sin perder energía cinética. A temperaturas tan bajas, los átomos casi dejan de moverse. Los científicos habían descubierto un "superfluido".

Cuando se agitan superfluidos, se forman vórtices que pueden girar indefinidamente. Tienen mayor conductividad térmica que cualquier sustancia conocida: cientos de veces mayor que el cobre, que a su vez tiene una alta conductividad térmica. Los superfluidos llamados "condensados de Bose-Einstein" se han utilizado experimentalmente como refrigerantes, y en 1998 el físico danés Lene Hau los utilizó para reducir la velocidad de la luz a 17 km/h (10 mph). Estos interruptores ópticos de "luz lenta" podrían reducir drásticamente los requisitos de energía.

Dinámica de fluidos aplicada

Predecir cómo se comportan los fluidos es fundamental para muchos procesos tecnológicos modernos. Por ejemplo, los sistemas de producción de alimentos en fábricas están diseñados para transportar ingredientes y productos alimenticios finales (desde jarabes hasta sopas) a través de tuberías y conductos. Una parte integral de este proceso es la dinámica de fluidos computacional (CFD), una rama de la dinámica de fluidos que puede maximizar la eficiencia, reducir costos y mantener la calidad. CFD tiene sus raíces en el trabajo del ingeniero francés Claude-Louis Navier. Basándose en trabajos anteriores del físico suizo Leonhard Euler, en 1822 Navier publicó ecuaciones que aplicaban la segunda ley del movimiento de Isaac Newton a los fluidos. Conocidas más tarde como ecuaciones de Navier-Stokes después de nuevas contribuciones del físico angloirlandés George Stokes a mediados del siglo XIX, pudieron explicar, por ejemplo, el movimiento del agua en los canales.

CFD es una rama de la dinámica de fluidos que utiliza modelos de flujo y otras herramientas para analizar problemas y predecir flujos. Puede tener en cuenta variables como cambios en la viscosidad de un fluido debido a la temperatura, velocidades de flujo alteradas causadas por cambios de fase (como fusión, congelación y ebullición) e incluso puede predecir los efectos del flujo turbulento en partes de una tubería. sistema.

BUSCANDO FUERA DE FUEGO-SECRETO

CALOR Y TRANSFERENCIAS

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
José Negro(1728-1799),
James Watt(1736-1819)

ANTES
1593 Galileo Galilei crea el termoscopio para mostrar cambios de calor.

1654 Fernando II de Medici, gran duque de Toscana, fabrica el primer termómetro sellado.

1714 Daniel Fahrenheit fabrica el primer termómetro de mercurio.

1724 Fahrenheit establece una escala de temperatura.

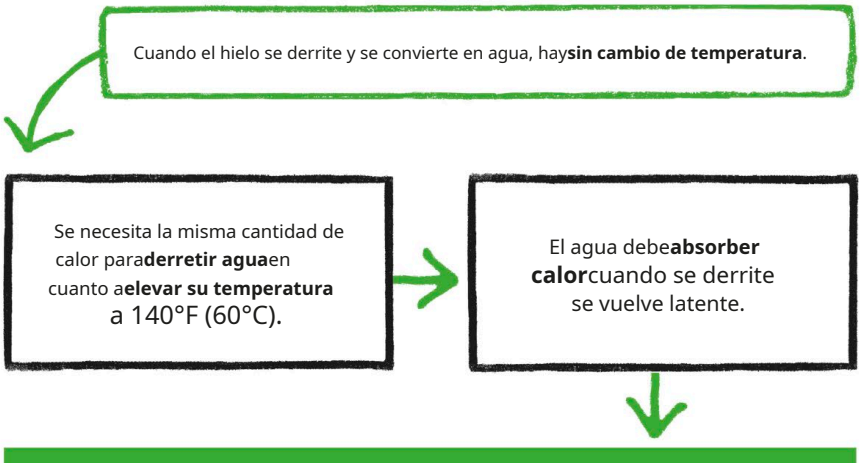
1742 Anders Celsius inventa la escala centígrada.

DESPUÉS
1777 Carl Scheele identifica el calor radiante.

C. 1780 Jan Ingenhousz aclara la idea de conducción de calor.

A principios del siglo XVII, los termoscopios comenzaron a aparecer en toda Europa. Estos tubos de vidrio llenos de líquido (que se muestran al lado) fueron los primeros instrumentos para medir qué tan calientes están las cosas. En 1714, el científico y fabricante de instrumentos holandés nacido en Alemania, Daniel Fahrenheit, creó el primer termómetro moderno, lleno de mercurio; estableció su famosa escala de temperatura en 1724. El científico sueco Anders Celsius inventó la escala centígrados, más conveniente, en 1742.

La introducción de la primera máquina de vapor exitosa en 1712 por parte del inventor británico Thomas Newcomen despertó un gran interés en el calor. En una conferencia de 1761, el químico escocés Joseph Black habló de los experimentos que había realizado sobre la fusión. Estos demostraron que la temperatura no cambiaba cuando el hielo se derretía en agua, pero derretir el hielo requería el mismo calor que se necesitaba para calentar el agua desde el punto de fusión hasta 140°F (60°C). Black se dio cuenta de que el calor debe ser absorbido cuando el hielo se derrite, y



El calor y la temperatura deben ser diferentes.

Ver también: Las leyes de los gases 82–85 · Energía interna y la primera ley de la termodinámica 86–89 · Motores térmicos 90–93 · Entropía y segunda ley de la termodinámica 94–99 · Radiación térmica 112–117

> El calor que desaparece en la conversión del agua. en vapor no se pierde, sino que se retiene en vapor.
>
> **José Negro**

llamó al calor absorbido "calor latente". El calor latente (oculto) es la energía necesaria para cambiar un material a otro estado. Black había hecho una distinción crucial entre el calor, que ahora sabemos que es una forma de energía, y la temperatura, que es una medida de energía.

James Watt también descubrió el concepto de calor latente en 1764. Watt estaba realizando experimentos en máquinas de vapor y notó que agregar un poco de agua hirviendo a mucha de agua fría apenas afecta la temperatura del agua fría, pero burbujear un poco de vapor a través del agua hace que hierva rápidamente.

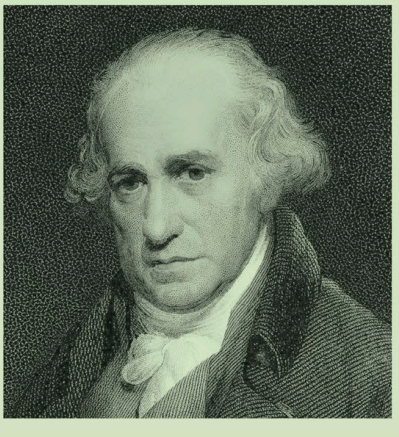
Termoscopios galileanos son tubos llenos de un líquido (a menudo etanol) que contienen "flotadores" llenos de líquido. El calor hace que cambie la densidad de todos los líquidos, haciendo que los flotadores suban o bajen.

como se mueve el calor

En 1777, un boticario de Suecia, Carl Scheele, hizo algunas observaciones simples pero cruciales, como el hecho de que en un día frío puedes sentir el calor de un fuego a unos metros de distancia y al mismo tiempo ver tu aliento en el aire frío. . Se trata de calor radiante y es radiación infrarroja (emitida por una fuente, como el fuego o el sol), que viaja como la luz; la radiación es bastante diferente del calor convectivo. La convección es la forma en que el calor se mueve a través de un líquido o gas; el calor hace que las moléculas y los átomos se dispersen; por ejemplo, cuando se calienta el aire encima de una estufa, éste se eleva.

Mientras tanto, alrededor de 1780, el científico holandés Jan Ingenhousz identificó un tercer tipo de transferencia de calor: la conducción. Esto ocurre cuando los átomos en una parte caliente de un sólido vibran mucho, chocan con sus átomos vecinos y, al hacerlo, transfieren energía (calor). Ingenhousz cubrió alambres de diferentes metales con cera, calentó un extremo de cada alambre y observó qué tan rápido se derretía la cera para cada metal.

James Watt



El ingeniero escocés James Watt fue una de las figuras fundamentales en la historia de la máquina de vapor. Watt, hijo de un fabricante de instrumentos de barco, adquirió una gran habilidad en la fabricación de instrumentos, en su taller de su padre y en Londres como aprendiz. Entonces él Regresó a Glasgow para fabricar instrumentos para la universidad.

En 1764, se le pidió a Watt que reparara una máquina de vapor modelo Newcomen. Antes de realizar ajustes prácticos al modelo, Watt llevó a cabo algunas investigaciones científicas. experimentos durante los cuales descubrió el calor latente.

Watt notó que el motor desperdiciaba mucho vapor y se le ocurrió una mejora revolucionaria: introducir un segundo cilindro con uno funcionando caliente y el otro frío. Este cambio transformó la máquina de vapor de una bomba de uso limitado a la fuente universal de energía que impulsó la Revolución Industrial.

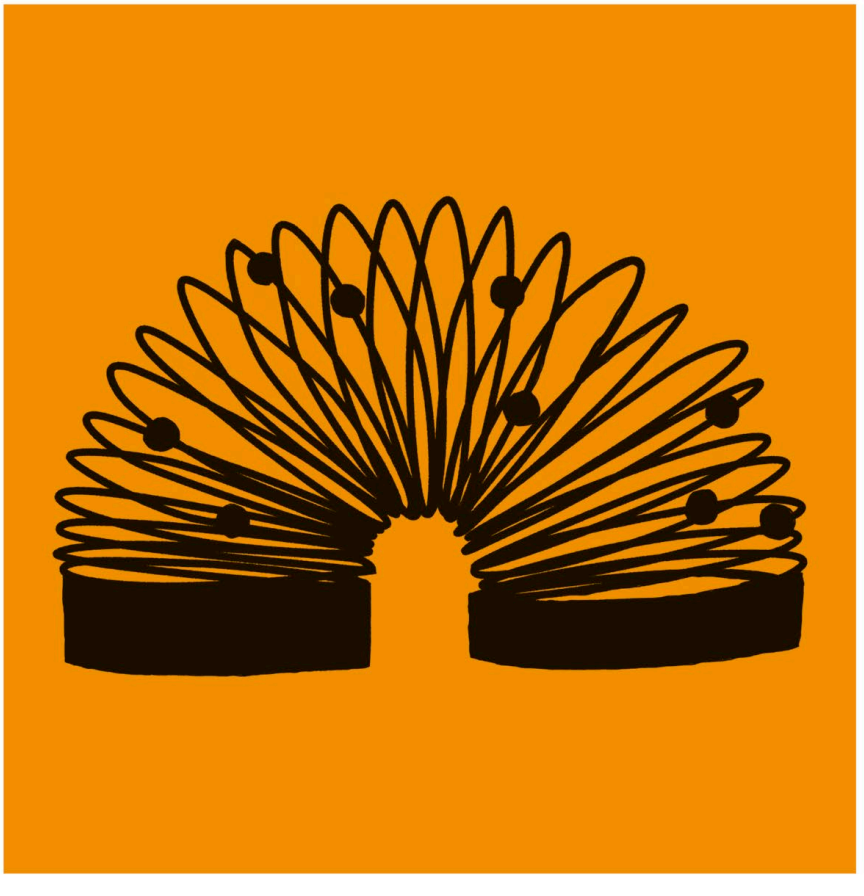
Inventos clave

1775 máquina de vapor de vatios **1779** Fotocopiadora
1782 Caballo de fuerza

ELÁSTICO

ENERGÍA EN EL AIRE

LAS LEYES DE LOS GASES



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES

Robert Boyle(1627-1691),
jacques charles(1746–1823),
Joseph Gay-Lussac
(1778-1850)

ANTES

1618 Isaac Beeckman
sugiere que, al igual que el agua, el aire ejerce presión.

1643físico italiano
Evangelista Torricelli fabrica el primer barómetro y mide la presión del aire.

1646 El matemático francés Blaise Pascal demuestra que la presión del aire varía con la altura.

DESPUÉS

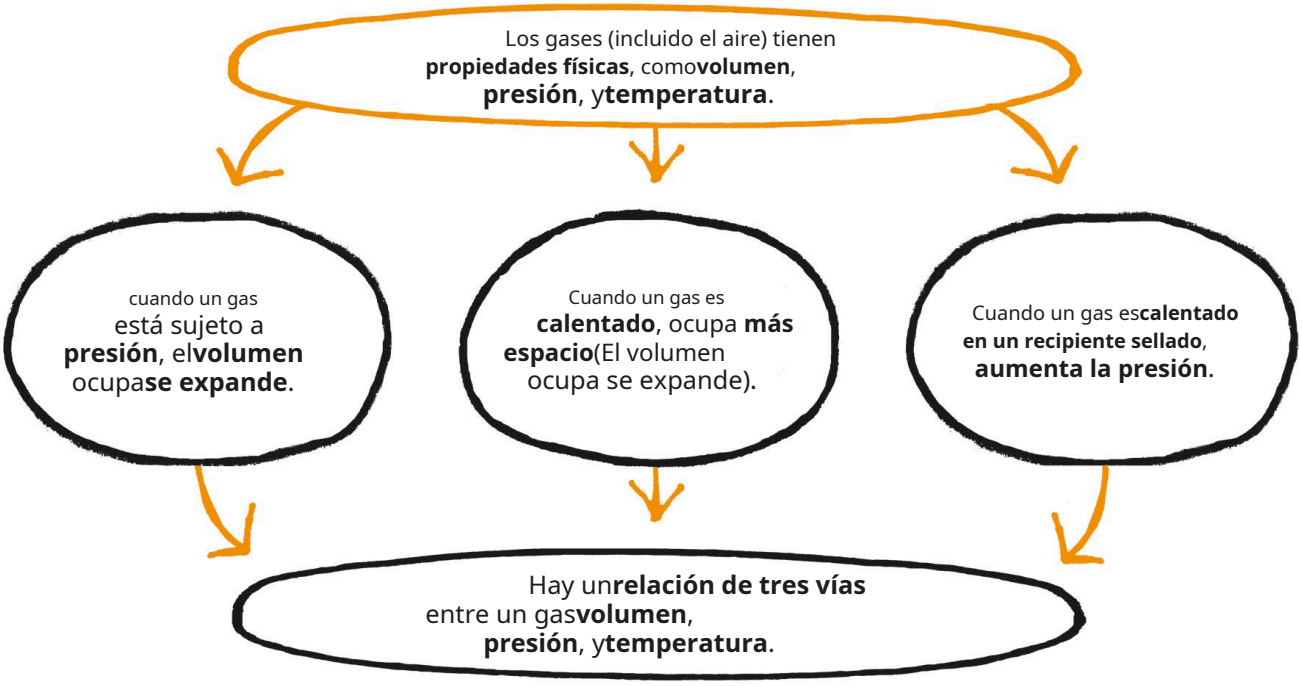
1820 El científico británico John Herapath presenta la teoría cinética de los gases.

1859 Rudolf Clausius demuestra que la presión está relacionada con la velocidad de las moléculas de gas.

El hecho de que los gases sean tan transparentes y aparentemente insustancial significó que a los filósofos naturales les llevó mucho tiempo apreciar que tenían alguna propiedad física.

Sin embargo, durante los siglos XVII y XVIII, los científicos europeos se dieron cuenta gradualmente de que, al igual que los líquidos y los sólidos, los gases sí tienen propiedades físicas. Estos científicos descubrieron la relación crucial entre la temperatura, la presión y el volumen de los gases. Durante un período de 150 años, los estudios realizados por tres individuos: Robert Boyle en Gran Bretaña y los franceses Jacques

Ver también: Presión 36 · Modelos de materia 68–71 Fluidos 76–79 · Motores térmicos 90–93 Cambios de estado y toma bonos 100–103 El desarrollo de la mecánica estadística 104-111



Charles y Joseph Gay-Lussac finalmente produjeron las leyes que explican el comportamiento de los gases.

La presión del aire

A principios del siglo XVII, el científico holandés Isaac Beeckman sugirió que, al igual que el agua, el aire ejerce presión. El gran científico italiano Galileo Galilei no estaba de acuerdo, pero el joven protegido de Galileo, Evangelista Torricelli, no sólo le dio la razón a Beeckman, sino que también mostró cómo medir la presión inventando el primer barómetro del mundo.

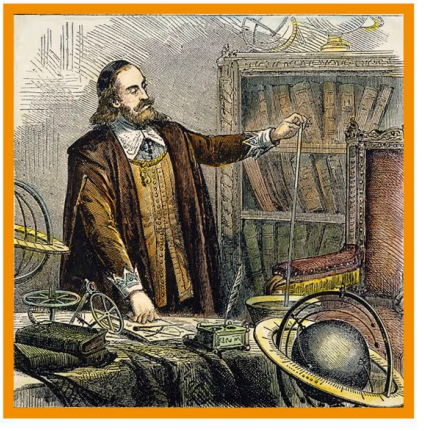
Galileo había observado que un sifón nunca podía elevar el agua por encima de los 10 m (33 pies). En ese momento, se pensaba que las aspiradoras "chupaban" líquidos, y Galileo pensó erróneamente que ese era el peso máximo de agua que una aspiradora encima podía aspirar. En 1643, Torricelli demostró que la El límite era, en cambio, el peso máximo de agua que la presión del aire exterior podía soportar.

Para demostrar su punto, Torricelli llenó un tubo cerrado en un extremo con mercurio, un líquido mucho más denso que el agua, y luego lo puso boca abajo. El mercurio cayó a unos 76 cm (30 pulgadas) por debajo del extremo cerrado y luego dejó de caer. Concluyó que ésta era la altura máxima que podía soportar la presión del aire exterior. La altura del mercurio en el tubo variaría ligeramente en respuesta a los cambios en la presión del aire, razón por la cual se describe como el primer barómetro.

El "resorte del aire" de Boyle

El innovador invento de Torricelli allanó el camino para el descubrimiento de la primera de las leyes de los gases, conocida como ley de Boyle.

después de Robert Boyle. Robert Boyle, hijo menor de Richard Boyle, primer conde de Cork y en su día el hombre más rico de Irlanda, utilizó su riqueza heredada para establecerse en-



Evangelista Torricelli Usó una columna de mercurio para medir la presión del aire. Dedujo que el aire que presionaba el mercurio de la cisterna equilibraba la columna del tubo.

> Aire cuando se reduce
> a la mitad de su extensión habitual
> [volumen] obtenido...
> dos veces más contundente
> un resorte [presión].
> **Robert Boyle**

Oxford su propio laboratorio privado de investigación científica, el primero de la historia. Boyle fue un defensor pionero de la ciencia experimental y fue aquí donde llevó a cabo experimentos cruciales sobre la presión del aire que describió en su libro conocido brevemente como *Tocando el resorte y el peso del aire* (publicado en 1662). "Resorte" era su palabra para presión; consideraba que el aire comprimido actuaba como si tuviera resortes que retroceden cuando se empuja.

Inspirándose en el barómetro de Torricelli, Boyle vertió mercurio en un tubo de vidrio en forma de J sellado en el extremo inferior. Pudo ver que el volumen de aire atrapado en la punta inferior de la J variaba según la cantidad de mercurio que añadía.

En otras palabras, había una relación clara entre la cantidad de mercurio que podía soportar el aire y su volumen.

Boyle argumentó que el volumen (V) de un gas y su presión (pag) varían en proporción inversa, siempre que la temperatura se mantenga igual. Matemáticamente esto se expresa como pv=k, una constante (un número que no cambia). En otras palabras, si disminuyes el volumen de un gas, su presión aumenta. Algunas personas dan crédito al crucial descubrimiento al amigo de Boyle, Richard Townley, y a un amigo de Townley, el médico Henry Power. El propio Boyle llamó a la idea "la hipótesis de Townley", pero fue Boyle quien dio a conocer la idea.

El descubrimiento del aire caliente de Charles

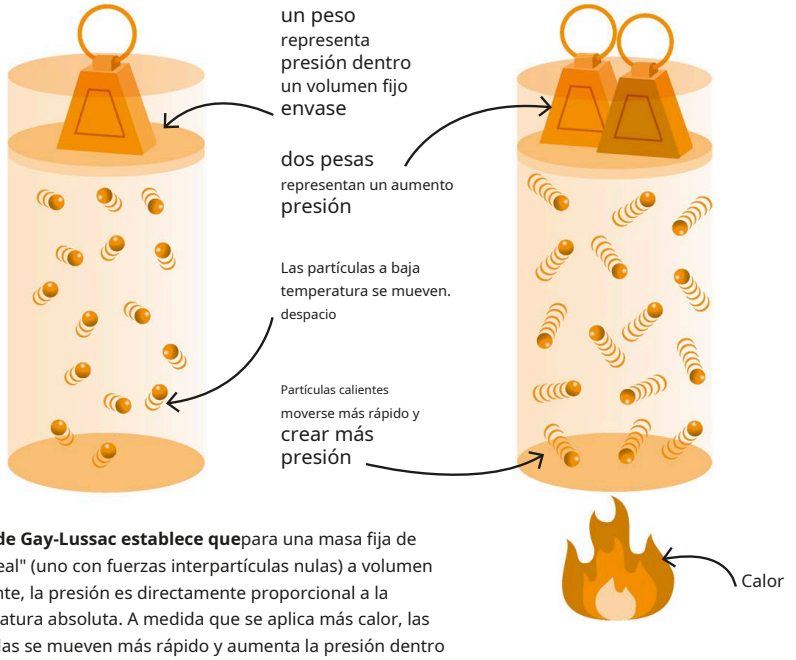
Poco más de un siglo después, el científico francés y pionero de los globos Jacques Charles añadió un tercer elemento a la relación entre volumen y presión: la temperatura. Charles fue la primera persona en experimentar con globos llenos de hidrógeno en lugar de aire caliente, y el 27 de agosto de 1783, en París, envió el primer gran globo de hidrógeno.

En 1787, Charles realizó un experimento con un recipiente de gas cuyo volumen podía variar libremente. Luego calentó el gas y midió el volumen a medida que aumentaba la temperatura. Vio que por cada grado de aumento de temperatura, el gas se expandía en 1/273 de su volumen a 32°F (0°C). Se contrajo en el misma velocidad a la que se enfriaba. Si se representa en un gráfico, muestra que el volumen se reduciría a cero a -460 °F, ahora conocido como cero absoluto, y el punto cero en la escala Kelvin. Charles había descubierto una ley que describe cómo varía el volumen con la temperatura siempre que la presión se mantenga estable.

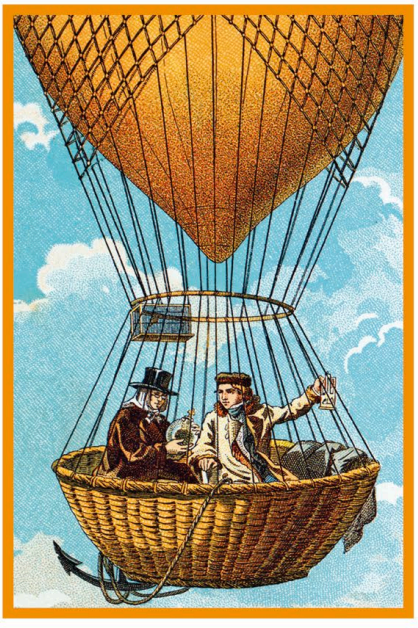
Charles nunca escribió sus ideas. En cambio, fueron descritos y aclarados a principios del siglo XIX en un artículo escrito por su colega científico francés Joseph Gay-Lussac, casi al mismo tiempo que el científico inglés John Dalton demostraba que la regla se aplicaba universalmente a todos los gases.

Una tercera dimensión

Gay-Lussac añadió una tercera ley de los gases a las de Boyle y Charles. Conocida como ley de Gay-Lussac, demostró que si la masa y el volumen de un gas se mantienen constantes, la presión aumenta en función de la temperatura. Como pronto quedó claro,



La ley de Gay-Lussac establece que para una masa fija de gas "ideal" (uno con fuerzas interpartículas nulas) a volumen constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura absoluta. A medida que se aplica más calor, las partículas se mueven más rápido y aumenta la presión dentro del recipiente.



Joseph Gay-Lussac Empleó globos atmosféricos para varios experimentos. En esta ascensión de 1804 con Jean-Baptiste Biot, estudió cómo la intensidad electromagnética de la Tierra variaba con la altitud.

Existe una relación simple de tres vías entre el volumen, la presión y la temperatura de los gases. Esta relación se aplica a los gases ideales (gases con fuerzas entre partículas nulas), aunque es aproximadamente cierta para todos los gases.

Cómo se combinan los gases

Gay-Lussac hizo otra contribución importante a nuestra comprensión de los gases. En 1808, se dio cuenta de que cuando los gases se combinan, lo hacen en proporciones simples de volumen, y que cuando dos gases reaccionan, el volumen de gases producidos depende de los volúmenes originales. Entonces, dos volúmenes de hidrógeno se unen a un volumen de oxígeno en una proporción de 2:1 para crear dos volúmenes de vapor de agua.

Dos años más tarde, el científico italiano Amedeo Avogadro explicó este descubrimiento relacionándolo con las ideas que surgían rápidamente sobre los átomos y otras partículas. Teorizó que a una temperatura y presión determinadas, volúmenes iguales de todos los gases tienen el mismo número de "moléculas". En efecto, el número de moléculas varía exactamente con el volumen. Esto se llama hipótesis de Avogadro y explica el descubrimiento de Gay-Lussac de que los gases se combinan en proporciones particulares.

Fundamentalmente, la hipótesis de Avogadro indicaba que el oxígeno por sí solo existía como moléculas de doble átomo, que se dividían para combinarse con dos átomos de hidrógeno en el vapor de agua; esto debe ser así para que haya tantas moléculas de agua como moléculas de hidrógeno y oxígeno. .

Este trabajo fue importante para el desarrollo de la teoría atómica y la relación entre átomos y moléculas. También fue vital para la teoría cinética de los gases desarrollada por James Clerk Maxwell y otros. Esto afirma que las partículas de gas se mueven aleatoriamente y producen calor cuando chocan. Ayuda a explicar la relación entre presión, volumen y temperatura.·

> "compuestos de gas sustancias entre sí siempre se forman en muy razones simples, de modo que representando uno de los términos por la unidad, el otro es 1, 2 o como máximo 3. **Joseph Gay-Lussac**"

Joseph Gay-Lussac

El químico y físico francés Joseph Gay era hijo de un abogado adinerado. La familia poseía gran parte del pueblo de Lussac en el suroeste de Francia que, en 1803, tanto el padre como el hijo incorporaron Lussac a sus nombres. Joseph estudió química en París antes de trabajar como investigador en el laboratorio de Claude-Louis Berthollet. A los 24 años, ya había descubierto la ley de los gases que lleva su nombre.

Gay-Lussac también fue un pionero de los globos y en 1804 ascendió en un globo a más de 7.000 m (22.965 pies) con su colega físico francés Jean-Baptiste Biot para tomar muestras de aire a diferentes alturas. A partir de estos experimentos, demostró que la composición de la atmósfera no cambia con la altura y la disminución de la presión. Además de su trabajo sobre los gases, Gay-Lussac también descubrió dos nuevos elementos, el boro y el yodo.

Trabajos clave

1802"Sobre la expansión de gases y vapores",*Anales de química*
1828*Lecciones de Física*

LA ENERGÍA DEL UNIVERSO ES CONSTANTE

ENERGÍA INTERNA Y PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Guillermo Rankine
(1820-1872)

ANTES

1749Émilie du Châtelet introduce implícitamente la idea de energía y su conservación.

1798 Benjamín Thompson
Desarrolla la idea de que el calor es una forma de energía cinética.

1824 El científico francés Sadi Carnot concluye que no existen procesos reversibles en la naturaleza.

Década de 1840 James Joule, Hermann von Helmholtz y Julius von Mayer presentan la teoría de la conservación de la energía.

DESPUÉS

1854 Guillermo Rankine introduce energía potencial.

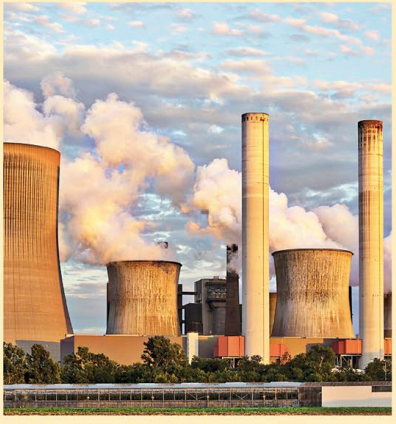
1854 Rudolf Clausius publica su declaración sobre la segunda ley de la termodinámica.

A finales del siglo XVIII, los científicos habían comenzado a comprender que el calor era diferente de la temperatura. Joseph Black y James Watt habían demostrado que el calor era una cantidad (mientras que la temperatura era una medida), y el desarrollo de las máquinas de vapor a lo largo de la Revolución Industrial centró el interés científico en cómo exactamente el calor daba tal potencia a esas máquinas.

En ese momento, los científicos siguieron la teoría "calórica": la idea de que el calor era un fluido misterioso o un gas ingrávido llamado calórico que fluía de los cuerpos más calientes a los más fríos. La conexión entre calor y movimiento se había descubierto desde hacía mucho tiempo.

Ver también: Energía cinética y energía potencial 54 · La conservación de la energía 55. Calor y transferencias 80–81 · Motores térmicos 90–93 Entropía y segunda ley de la termodinámica 94–99 · Radiación térmica 112–117

Generar electricidad



La quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) para generar electricidad es un ejemplo clásico de una cadena de conversiones de energía. Comienza con la energía solar de los rayos del sol. Las plantas convierten la energía solar en energía química a medida que crecen; esta luego se "almacena" como energía química potencial en los enlaces químicos formados. La energía almacenada se concentra a medida que las plantas se comprimen en carbón, petróleo y gas.

El combustible se quema, creando energía térmica, que calienta el agua para producir vapor, y el vapor hace girar las turbinas (convirtiendo energía térmica en energía cinética), que genera electricidad (energía potencial eléctrica). Finalmente, la electricidad es convertidos en formas útiles de energía, como la luz de las bombillas o el sonido de los altavoces. A lo largo de todos estos conversiones, la energía total siempre permanece igual. Durante todo el proceso, la energía se convierte de una forma a otra, pero nunca se crea ni se destruye, y no hay pérdida de energía cuando una forma de energía se cambia a otra.

Se ha reconocido, pero nadie ha valorado plenamente lo fundamental que es este vínculo. En la década de 1740, la matemática francesa Émilie du Châtelet estudió el concepto de impulso e introdujo la idea de "energía" mecánica, que es la capacidad de hacer que sucedan cosas, aunque no la nombró como tal en ese momento.

Pero cada vez estaba más claro que los objetos en movimiento tenían energía, más tarde identificada como energía "cinética".

El calor es energía.

En 1798, el físico estadounidense Benjamin Thompson, más tarde conocido como el Conde Rumford, realizó un experimento en una fundición de cañones en Munich. Quería medir el calor generado por la fricción cuando se perforaban los cañones de los cañones. Después de muchas horas de fricción continua con una máquina perforadora sin filo, todavía se generaba calor, pero no había ningún cambio en la estructura del metal del cañón, por lo que estaba claro que no se estaba perdiendo nada físico (ni fluido calórico) por el proceso. el metal. Parecía que el calor debía estar en el movimiento. En otras palabras, el calor es energía cinética: la energía del movimiento. Pero pocas personas aceptaron esta idea y la teoría calórica se mantuvo durante otros 50 años.

El gran avance provino de varios científicos simultáneamente en la década de 1840, incluidos James Joule en Gran Bretaña y Hermann von Helmholtz y Julius von Mayer en Alemania. Lo que todos vieron fue que el calor era una forma de energía con la capacidad de producir algo.

> Ya ves, por tanto, que la fuerza viva puede convertirse en calor, y el calor puede convertirse en fuerza viva.
>
> **James Joule**

sucede, al igual que la fuerza muscular. Llegarían a darse cuenta de que todas las formas de energía son intercambiables.

En 1840, Julius von Mayer había estado observando la sangre de los marineros en los trópicos y descubrió que la sangre que regresaba a los pulmones todavía era rica en oxígeno. En lugares más fríos, la sangre de una persona regresaría a los pulmones con mucho menos oxígeno. Esto significaba que, en los trópicos, el cuerpo necesitaba quemar menos oxígeno para mantenerse caliente. La conclusión de Mayer fue que el calor y todas las formas de energía (incluidas las de sus observaciones: la fuerza muscular, el calor del cuerpo y el calor del sol) son intercambiables y pueden cambiar de una forma a otra, pero nunca crearse. La energía total seguirá siendo la misma. Sin embargo, Mayer era médico y los físicos prestaban poca atención a su trabajo.

Convirtiendo energía

Mientras tanto, el joven James Joule comenzó a experimentar en un laboratorio de la casa familiar en Salford, cerca de Manchester. En 1841, descubrió cuánto

El calor se produce mediante una corriente eléctrica. Luego experimentó con formas de convertir el movimiento mecánico en calor y desarrolló un famoso experimento en el que un peso que cae hace girar una rueda de paletas en agua, calentando el agua (como se muestra a continuación). Midiendo el aumento de la temperatura del agua, Joule pudo calcular cuánto calor generaría una determinada cantidad de trabajo mecánico. Los cálculos de Joule le llevaron a creer que nunca se pierde energía en esta conversión. Pero al igual que la investigación de Mayer, las ideas de Joule fueron inicialmente ignoradas en gran medida por la comunidad científica.

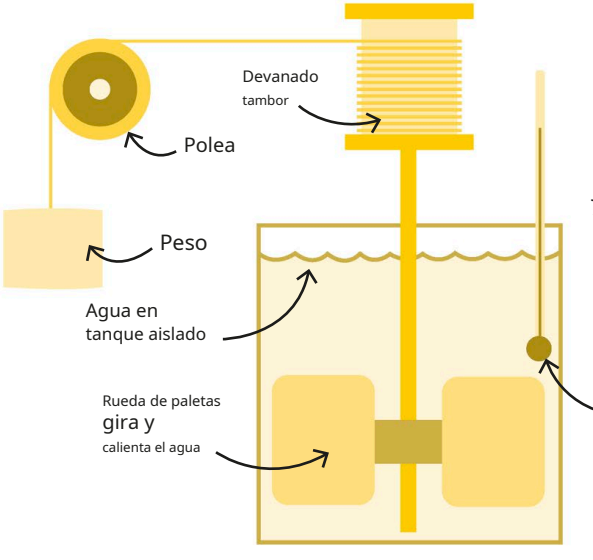
Luego, en 1847, Hermann von Helmholtz publicó un artículo clave, que se basó en sus propios estudios y los de otros científicos, incluido Joule. El artículo de Helmholtz resumió la teoría de la conservación de la energía. El mismo año, Joule presentó su trabajo en una reunión de la Asociación Británica en Oxford. Después de la reunión, Joule conoció a William Thomson (quien más tarde se convirtió en Lord Kelvin), y los dos trabajaron en la teoría de los gases y en cómo los gases se enfrían cuando se enfrían.

se expanden: la base de la refrigeración. Joule también hizo la primera estimación clara de la velocidad media de las moléculas en un gas.

la primera ley

A lo largo de la siguiente década, Helmholtz y Thomson (junto con el alemán Rudolf Clausius y el escocés William Rankine) comenzaron a reunir sus hallazgos. Thomson utilizó por primera vez la frase "termodinámica" en 1849 para resumir el poder del calor. Durante el año siguiente, Rankine y Clausius (aparentemente de forma independiente)
Desarrolló lo que ahora se llama la primera ley de la termodinámica. Al igual que Joule, Rankine y Clausius se centraron en el trabajo: la fuerza utilizada para mover un objeto a cierta distancia. A lo largo de sus estudios, vieron una conexión universal entre calor y trabajo. Es significativo que Clausius también comenzara a utilizar la palabra "energía" para describir la capacidad de realizar un trabajo.

En Gran Bretaña, Thomas Young acuñó la palabra "energía" en 1802 para explicar el efecto combinado de masa y velocidad. A finales del siglo XVII, el erudito alemán



rueda de paletas de Joule experimentopresentado una rueda de paletas dentro de un tanque de agua, impulsada por pesas que caen—esto hizo que la temperatura del agua aumentara. Joule midió el temperatura para calcular cuánto calor produce una cierta cantidad de energía mecánica. el trabajo crearía.

> Los objetos más comunes
> son presentados por la ciencia
> precioso.
> **Guillermo Rankine**

Gottfried Leibniz se refirió a esto como *frente a visa*o "fuerza viva", que era un término que todavía utilizaba Rankine. Pero no fue hasta la década de 1850 que surgió todo su significado y la palabra "energía" en su sentido moderno comenzó a utilizarse con regularidad.

Clausius y Rankine trabajaron en el concepto de energía como cantidad matemática, de la misma manera que Newton había revolucionado nuestra comprensión de la gravedad al simplemente considerarla como una regla matemática universal, sin describir realmente cómo funciona. Finalmente consiguieron desterrar la idea calórica del calor como sustancia. El calor es energía, una capacidad para realizar trabajo y, por lo tanto, debe ajustarse a otra regla matemática simple: la ley de conservación de la energía. Esta ley muestra que la energía no se puede crear ni destruir; puede
sólo puede transferirse de un lugar a otro o convertirse en otras formas de energía. En términos simples, la primera ley de la termodinámica es la ley de conservación de la energía aplicada al calor y al trabajo.

Las ideas y la investigación de Clausius y Rankine se inspiraron en el intento de comprender teóricamente cómo funcionaban los motores. Entonces Clausius miró la energía total en un recinto cerrado.

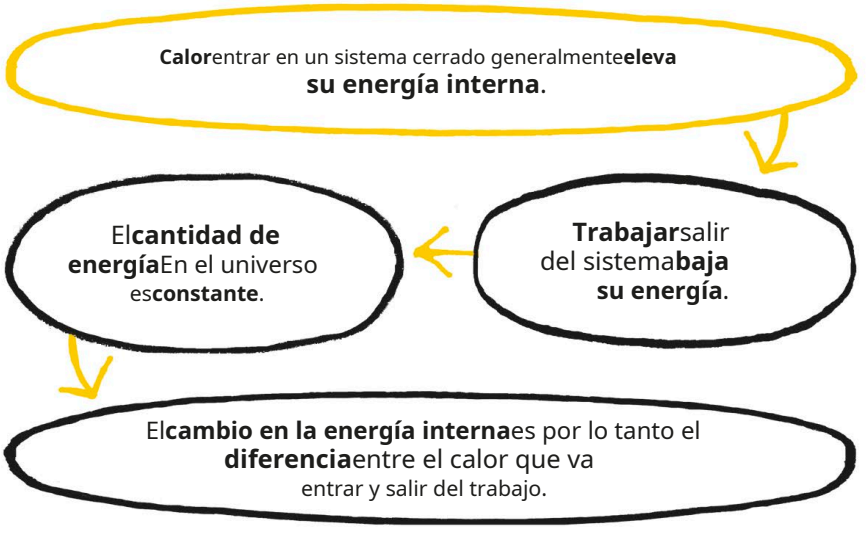
sistema (un sistema donde la materia no puede entrar ni salir, pero sí energía, como en los cilindros de una máquina de vapor) y habló de su "energía interna". No se puede medir la energía interna del sistema, pero sí la energía que entra y sale. El calor es una transferencia de energía hacia el interior del sistema y una combinación de calor y trabajo es una transferencia hacia afuera.

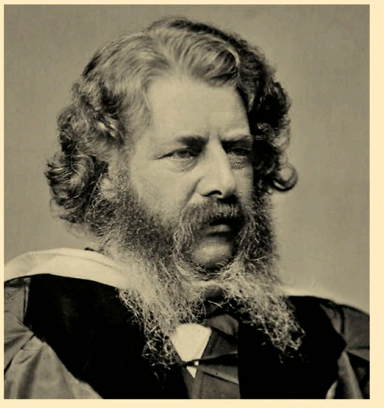
Según la ley de conservación de la energía, cualquier cambio en la energía interna siempre debe ser la diferencia entre la energía que entra al sistema y la energía que sale; esto también equivale a la diferencia total entre calor y trabajo. Pon más calor en el mismo sistema y obtendrás más trabajo, y también al revés: esto se ajusta a la primera ley de la termodinámica. Esto debe ser así porque la energía total en el universo (toda la energía que rodea el sistema) es constante, por lo que las transferencias hacia adentro y hacia afuera deben coincidir.

Categorías de Rankine

Rankine era ingeniero mecánico, lo que significaba que le gustaba darle un giro práctico a cosas. Así que hizo una útil división de la energía en dos tipos: energía almacenada y energía de trabajo. La energía almacenada es energía que se mantiene quieta, lista para moverse, como un resorte comprimido o un esquiador parado en la cima de una pendiente. Hoy describimos la energía almacenada como energía potencial. El trabajo es la acción realizada para almacenar energía o es el movimiento cuando esa energía está desatado. La categorización de la energía que hizo Rankine de esta manera fue una forma simple y duraderamente efectiva de considerar la energía en sus fases de reposo y movimiento.

A finales de la década de 1850, el notable trabajo de du Châtelet, Joule, Helmholtz, Mayer, Thomson, Rankine y Clausius había transformó nuestra comprensión del calor. Este grupo pionero de jóvenes científicos había revelado la relación recíproca entre calor y movimiento. También habían comenzado a comprender y mostrar la importancia universal de esta relación. Lo resumieron en el término "termodinámica": la idea de que la cantidad total de energía en el universo debe ser siempre constante y no puede cambiar.





Guillermo Rankine

El escocés William Rankine nació en Edimburgo en 1820. Se convirtió en ingeniero ferroviario, como su padre, pero, fascinado por la ciencia detrás de las máquinas de vapor con las que trabajaba, más tarde pasó a estudiar ciencias.

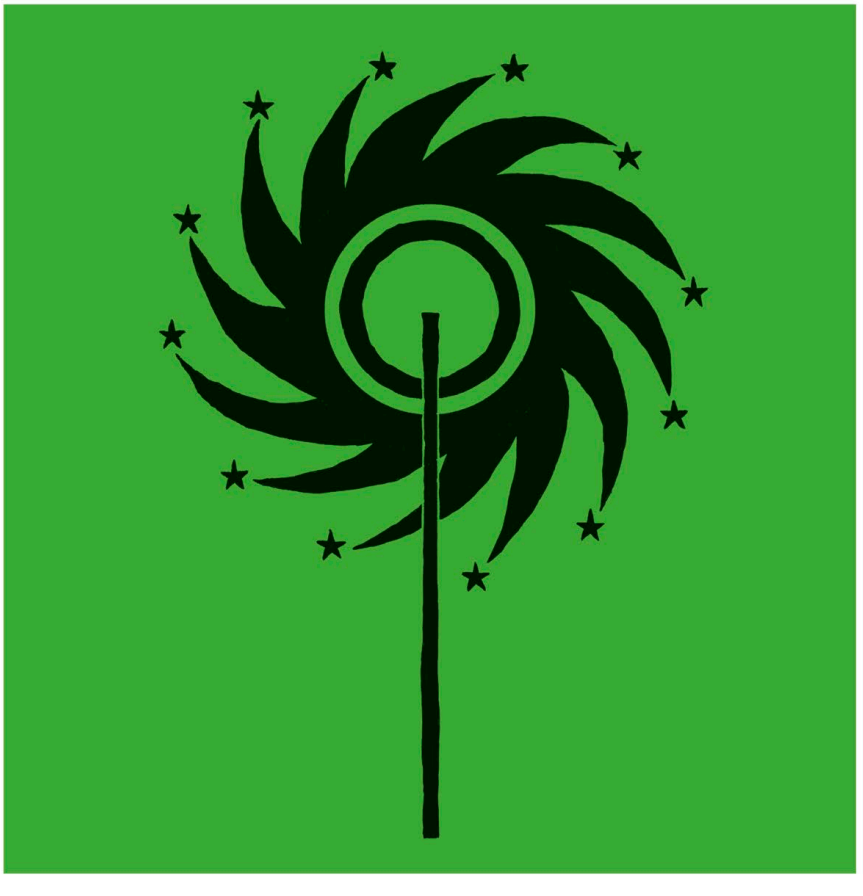
Junto con los científicos Rudolf Clausius y William Thomson, Rankine se convirtió en uno de los padres fundadores de la termodinámica. Ayudó a establecer las dos leyes clave de la termodinámica y definió la idea de energía potencial. Rankine y Clausius también describieron de forma independiente la función de entropía (la idea de que el calor se transfiere de forma desordenada). Rankine escribió una teoría completa de la máquina de vapor y de todas las máquinas térmicas, y contribuyó al alejamiento final de la teoría calórica del calor como fluido. Murió en Glasgow, a la edad de 52 años, en 1872.

Trabajos clave

1853 "Sobre la Ley General de Transformación de la Energía"
1855 "Esquemas de la Ciencia de la Energética"

EL CALOR PUEDE SER UNA CAUSA DE MOVIMIENTO

MOTORES TÉRMICOS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Sadi Carnot(1796-1832)

ANTES
C.50CE Hero of Alexandria construye una pequeña máquina de vapor conocida como eólipile.

1665 Robert Boyle publica *Una historia experimental del frío*, un intento de determinar la naturaleza del frío.

1712 Thomas Newcomen construye la primera máquina de vapor exitosa.

1769 James Watt crea su máquina de vapor mejorada.

DESPUÉS
1834británico-estadounidense inventor jacob perkins Hace el primer frigorífico.

1859ingeniero belga Étienne Lenoir desarrolla con éxito el primer motor de combustión interna.

Es difícil sobreestimar el impacto de la llegada de la máquina de vapor en el siglo XVIII. Las máquinas de vapor dieron a la gente una fuente de energía antes inimaginable. Eran máquinas prácticas, construidas por ingenieros y utilizadas a gran escala para impulsar la Revolución Industrial. Los científicos quedaron fascinados por cómo se creó el asombroso poder de las máquinas de vapor, y su curiosidad impulsó una revolución centrada en el calor.

La idea de la energía del vapor es antigua. Ya en el siglo III antes de Cristo, un inventor griego en Alejandría llamado Ctesibius se dio cuenta de que el vapor sale a chorros

Ver también: Energía cinética y energía potencial 54 · Calor y transferencias 80–81 Energía interna y la primera ley. de termodinámica 86–89 Entropía y segunda ley de la termodinámica 94–99

> Quitarle hoy a Inglaterra sus máquinas de vapor sería quitarle al mismo tiempo el carbón y el hierro.
>
> **Sadi Carnot**

poderosamente del pico de un recipiente lleno de agua calentado al fuego. Empezó a jugar con la idea de una eolipila o bola de viento, una esfera hueca sobre un pivote. Cuando el agua del interior hervía, el vapor en expansión escapaba en chorros de dos boquillas direccionales curvas, una a cada lado. Los chorros fijan la esfera.
hilado. Unos 350 años después, otro alejandrino, llamado Hero, creó un diseño funcional para un eólípila, del que desde entonces se han construido réplicas. Ahora se sabe que cuando el agua líquida se convierte en vapor (vapor), los enlaces que mantienen sus moléculas entre sí se rompen, lo que hace que se expanda.

El dispositivo de Hero, sin embargo, era simplemente un juguete, y aunque varios inventores experimentaron con el vapor, pasaron otros 1.600 años antes de que se construyera la primera máquina de vapor práctica. El gran avance fue el descubrimiento del vacío y el poder de la presión del aire en el siglo XVII. en un famoso
En una demostración en 1654, el físico alemán Otto von Guericke demostró que la presión atmosférica era lo suficientemente poderosa como para mantener unidas las dos mitades de una esfera drenada.

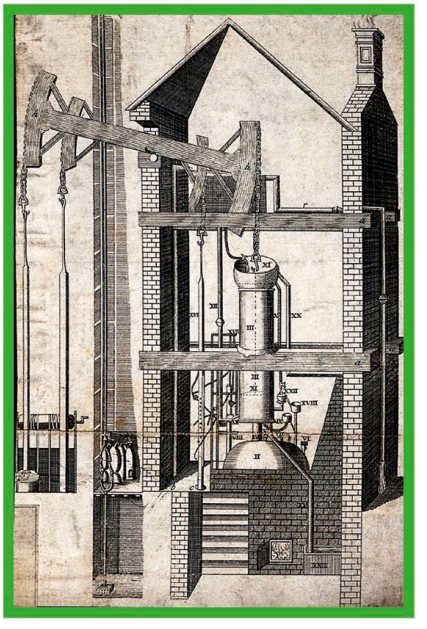
El primer éxito La máquina de vapor fue inventada por Thomas Newcomen para bombear agua de las minas. Funcionó enfriando vapor en un cilindro para crear un vacío parcial y dibujar un pistón.

de aire contra la fuerza de tracción de ocho fuertes caballos. Este descubrimiento abrió una nueva forma de utilizar el vapor, muy diferente a los jets de Hero. El inventor francés Denis Papin se dio cuenta en la década de 1670 de que si el vapor atrapado en un cilindro se enfría y se condensa, se contrae dramáticamente para crear un vacío poderoso, lo suficientemente fuerte como para impulsar un pistón pesado, un componente móvil de los motores. Entonces, en lugar de utilizar el poder expansivo del vapor, el nuevo descubrimiento utilizó la contracción masiva cuando se enfría y se condensa.

Revolución del vapor

En 1698, el inventor inglés Thomas Savery construyó la primera gran máquina de vapor utilizando el principio de Papin. Sin embargo, el motor de Savery utilizaba vapor a alta presión, lo que lo hacía peligrosamente explosivo y poco confiable. Thomas Newcomen, vendedor de hierro de Devon, construyó en 1712 una máquina mucho más segura, que utilizaba vapor a baja presión. Aunque la máquina de Newcomen tuvo tanto éxito que se instaló en miles de minas de Gran Bretaña y Europa en 1755, era ineficiente porque el cilindro Había que enfriarlo en cada golpe para condensar el vapor, y esto consumía una enorme cantidad de energía.

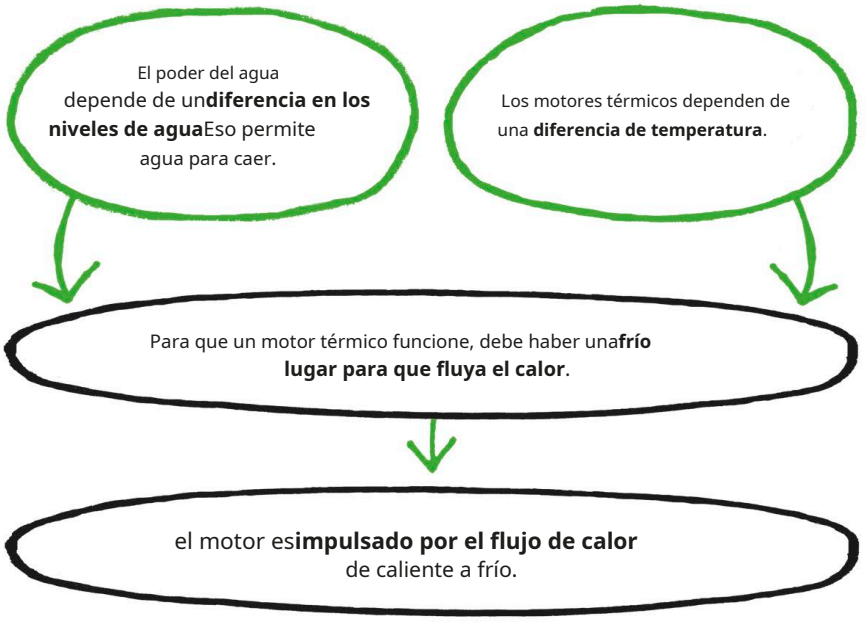
En la década de 1760, para mejorar la máquina Newcomen, el ingeniero escocés James Watt llevó a cabo los primeros experimentos científicos sobre la forma en que se mueve el calor en una máquina de vapor. Sus experimentos llevaron a su descubrimiento, junto con su



su compatriota Joseph Black, que es el calor, no la temperatura, lo que proporciona la fuerza motriz del vapor. Watt también se dio cuenta de que la eficiencia de las máquinas de vapor podía mejorarse enormemente utilizando no un cilindro sino dos: uno que se mantenía caliente todo el tiempo y otro frío separado para condensar el vapor. Watt también introdujo una manivela para convertir el movimiento hacia arriba y hacia abajo del pistón en el movimiento giratorio necesario para impulsar una rueda. Esto suavizó la acción de las carreras del pistón para mantener una potencia constante. Las innovaciones de Watt tuvieron un éxito extraordinario y se podría decir que iniciaron la era del vapor.

Energía y termodinámica

La eficiencia de las máquinas de vapor intrigó al joven ingeniero militar francés Sadi Carnot. Visitó fábrica tras fábrica, estudiando no sólo sus máquinas de vapor sino también



los impulsados por la fuerza hidráulica. En 1824, escribió un libro breve, *Reflexiones sobre la fuerza motriz del calor*. Carnot se dio cuenta de que el calor es la base de todo movimiento en la Tierra, impulsando los vientos y las corrientes oceánicas, los terremotos y otros cambios geológicos, y los movimientos de los músculos del cuerpo. Vio el cosmos como una máquina térmica gigante hecha de innumerables máquinas térmicas más pequeñas,

Sistemas impulsados por calor. Este fue el primer reconocimiento de la verdadera importancia del calor en el universo y proporcionó la plataforma de lanzamiento para la ciencia de la termodinámica.

Ver y comparar la energía hidráulica y de vapor en las fábricas le dio a Carnot una visión clave de la naturaleza de las máquinas térmicas. Como la mayoría de sus contemporáneos, creía en la teoría calórica: la idea falsa de que el calor era un fluido. Sin embargo, esta idea errónea le permitió ver una analogía clave entre la energía del agua y la del vapor. La energía hidráulica depende de una cabeza de agua, una diferencia en los niveles del agua, que permite que el agua caiga. Del mismo modo, Carnot vio que un motor térmico depende de una cabeza de calor que permite una "caída de calorías". En otras palabras, para que un motor térmico funcione no sólo debe haber calor, sino también un lugar frío al que fluir. El motor no es impulsado por el calor sino por el flujo de calor del calor al frío. Entonces la fuerza motriz es la diferencia entre frío y calor, no el calor en sí mismo.

Eficiencia perfecta

Carnot tuvo una segunda idea clave: para generar la máxima potencia no debe desperdiciarse ningún flujo de calor en ningún lugar ni momento. Un motor ideal es aquel en el que todo el flujo de calor se convierte en movimiento útil. Cualquier pérdida de calor que no genere fuerza motriz es una reducción en la eficiencia del motor térmico.

Para modelar esto, Carnot esbozó un motor térmico ideal teórico reducido a sus conceptos básicos. ahora conocido

Sadi Carnot

Nacido en París en 1796, Sadi Carnot provenía de una familia de científicos y políticos de renombre. Su padre, Lazare, fue un pionero en el estudio científico del calor, además de ocupar un alto puesto en el ejército revolucionario francés.
Sadi siguió a su padre a la academia militar. Después de graduarse en 1814, se unió a los ingenieros militares como oficial y fue enviado por Francia para realizar un informe sobre sus fortificaciones. Cinco años después, convertido en
Fascinado por las máquinas de vapor, se retiró del ejército para dedicarse a sus intereses científicos.

En 1824, Carnot escribió su innovador*Reflexiones sobre la fuerza motriz del calor*, que llamó la atención sobre la importancia de las máquinas térmicas e introdujo el ciclo de Carnot. Se prestó poca atención a la obra de Carnot.
En ese momento y antes de que se pudiera apreciar su importancia como punto de partida de la termodinámica, murió de cólera en 1832.

Obra clave

1824*Reflexiones sobre la fuerza motriz del calor*

> La producción de calor por sí sola no es suficiente para dar a luz. al poder impulsor: es necesario que haya También debe estar frío.
>
> **Sadi Carnot**

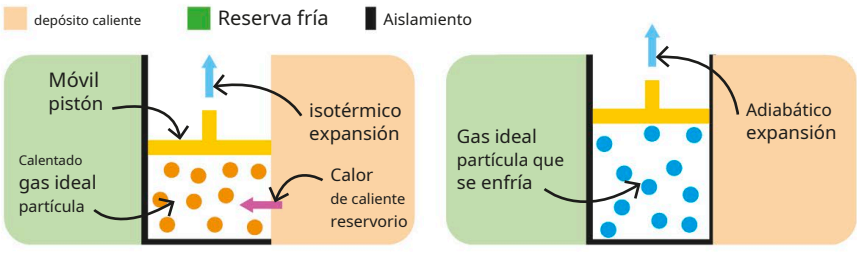
Como motor de Carnot, este motor ideal funciona en un ciclo de cuatro etapas. Primero, el gas se calienta por conducción desde una fuente externa (como un depósito de agua caliente) y se expande. En segundo lugar, el gas caliente se mantiene aislado (dentro de un cilindro, por ejemplo) y, a medida que se expande, realiza trabajo en su entorno (como empujar un pistón). A medida que se expande, el gas se enfría. En tercer lugar, el entorno empuja el pistón hacia abajo, comprimiendo el gas. El calor se transfiere del sistema al depósito de frío. Finalmente, a medida que el sistema se mantiene aislado y el pistón continúa empujando hacia abajo, la temperatura del gas vuelve a aumentar.

En las dos primeras etapas el gas se expande y en las dos segundas se contrae. Pero la expansión y la contracción pasan cada una por dos fases; isotérmica y adiabática. En el ciclo de Carnot, isotérmico significa que hay un intercambio de calor con el entorno, pero no hay cambio de temperatura en el sistema. Adiabático significa que no entra ni sale calor del sistema.

Carnot calculó la eficiencia de su máquina térmica ideal: si la temperatura más alta alcanzada est, y el mas frio est$_C$, la fracción de energía térmica que sale como trabajo (la eficiencia) se puede expresar como (t_h-t_C)/t_h=1-(t_C/t_h). Incluso

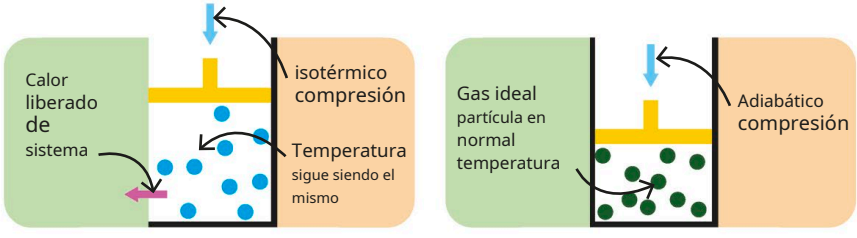
El motor ideal de Carnot está lejos de ser 100 por ciento eficiente, pero los motores reales son mucho menos eficientes que el de Carnot. A diferencia de la máquina ideal de Carnot, las máquinas reales utilizan procesos irreversibles. Una vez que se quema el petróleo, permanece quemado. Por tanto, el calor disponible para la transferencia se reduce continuamente. Y parte del trabajo producido por el motor se pierde en forma de calor a través de la fricción de las piezas móviles. La mayoría de los motores de los vehículos de motor tienen apenas un 25 por ciento de eficiencia, e incluso las turbinas de vapor tienen sólo un 60 por ciento de eficiencia en el mejor de los casos, lo que significa que se desperdicia mucho calor.

ciclo de carnot



Nivel 1: Hay una transferencia de calor desde el depósito caliente al gas en el cilindro. El gas se expande empujando el pistón hacia arriba. Esta etapa es isotérmica porque no hay cambio de temperatura en el sistema.

Etapa 2: El gas, ahora aislado de los depósitos, continúa expandiéndose a medida que se levanta peso del pistón. El gas se enfría a medida que se expande, aunque el sistema en general no pierde calor. Esta expansión es adiabática.



Etapa 3: Se agrega peso encima del pistón. Dado que el calor ahora puede transferirse del cilindro al depósito frío, el gas no aumenta de temperatura, por lo que esta etapa es isotérmica.

Etapa 4: Se agrega más peso sobre el pistón, comprimiendo el gas en el cilindro. Como el gas vuelve a estar aislado de los depósitos, la compresión hace que su temperatura aumente adiabáticamente.

El trabajo de Carnot sobre el calor apenas comenzaba cuando murió de cólera a la edad de 36 años. Desafortunadamente, sus copiosas notas fueron quemadas para destruir la infección, por lo que nunca sabremos hasta dónde llegó. Dos años después de su muerte, Benoît Paul Émile Clapeyron publicó un resumen del trabajo de Carnot utilizando gráficos para aclarar las ideas y actualizándolo para eliminar el elemento calórico. Como resultado, el trabajo pionero de Carnot sobre motores térmicos revolucionó nuestra comprensión del papel clave del calor en el universo.

y sentó las bases de la ciencia de la termodinámica.

LA ENTROPÍA DEL UNIVERSO TIENDE A UN MÁXIMO

ENTROPÍA Y SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Rudolf Clausius(1822–1888)

ANTES
1749 La matemática y física francesa Émilie du Châtelet presenta una idea temprana de la energía y cómo se conserva.

1777 En Suecia, el farmacéutico Carl Scheele descubre cómo el calor puede irradiarse a través del espacio.

1780 El científico holandés Jan Ingenhousz descubre que el calor se puede trasladar mediante conducción a través de materiales.

DESPUÉS
1876 El científico estadounidense Josiah Gibbs introduce la idea de energía libre.

1877 El físico austriaco Ludwig Boltzmann establece la relación entre entropía y probabilidad.

A mediados del siglo XIX, un grupo de físicos de Gran Bretaña, Alemania y Francia revolucionaron la comprensión del calor. Estos científicos, entre ellos William Thomson y William Rankine en Gran Bretaña; Hermann von Helmholtz, Julius von Mayer y Rudolf Clausius en Alemania; y Sadi Carnot en Francia demostraron que el calor y el trabajo mecánico son intercambiables. Ambas son manifestaciones de lo que se dio en llamar transferencias de energía.

Además, los físicos descubrieron que el intercambio de calor y trabajo mecánico está completamente equilibrado: cuando una forma de energía aumenta, otra debe disminuir. La energía total nunca puede perderse; simplemente cambia de forma. Esto pasó a denominarse ley de conservación de la energía y fue la primera ley de la termodinámica. Posteriormente Rudolf Clausius lo amplió y reformuló como "la energía del universo es constante".

Flujo de calor

Los científicos rápidamente se dieron cuenta de que existía otra teoría fundamental de la termodinámica relacionada con el flujo de calor. En 1824, El científico militar francés Sadi Carnot había imaginado una máquina térmica ideal en la que, contrariamente a lo que sucedía en la naturaleza, los cambios de energía eran reversibles: cuando una forma de energía se convertía en otra, se podía volver a cambiar sin pérdida de energía. En realidad, sin embargo, una gran parte de la energía utilizada por las máquinas de vapor no se tradujo en movimiento mecánico, sino que se perdió en forma de calor. Aunque los motores de mediados del siglo XIX eran más eficientes que los del siglo XVIII, estaban lejos de serlo.

> Ninguna otra parte de la ciencia ha contribuido tanto a la liberación del espíritu humano como la segunda ley de termodinámica.
>
> **Peter William Atkins**
> **químico británico**

Rudolf Clausius

Hijo de un director y pastor, Rudolf Clausius nació en Pomerania, Prusia (ahora Polonia) en 1822. Después de estudiar en la Universidad de Berlín, se convirtió en profesor en la Escuela de Artillería e Ingeniería de Berlín. En 1855, se convirtió en profesor de física en el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Zurich. Regresó a Alemania en 1867.

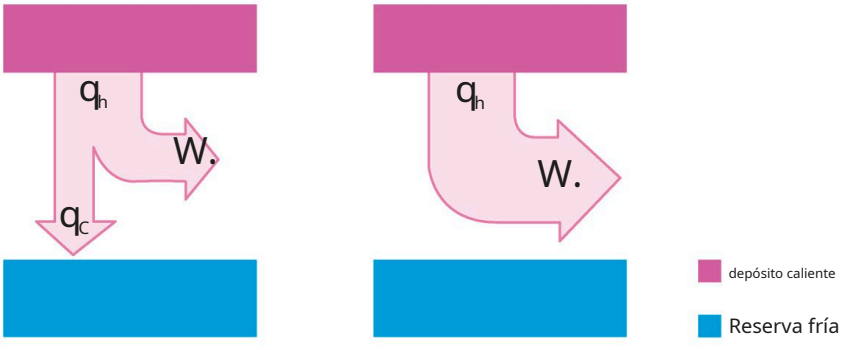
La publicación de su artículo "Sobre la fuerza móvil del calor" en 1850 marcó un paso clave en el desarrollo de la termodinámica. En 1865, introdujo el concepto de entropía, lo que le llevó a su hito. resúmenes de las leyes de la termodinámica: "La energía del universo es constante" y "La entropía del universo tiende a un máximo". Clausius murió en Bonn en 1888.

Trabajos clave

1850"Sobre la fuerza móvil del calor"
1856"Sobre una forma modificada del segundo teorema fundamental de la teoría mecánica del calor"
1867*La teoría mecánica del calor*

Ver también: Energía cinética y energía potencial 54–55 · Calor y transferencias 80–81 Energía interna y la primera ley de termodinámica 86–89 · Motores térmicos 90–93 Radiación térmica 112–117

Clausius se dio cuenta de que en una máquina térmica real, es imposible extraer una cantidad de calor (q_h) de un depósito caliente y utilizar todo el calor extraído para realizar trabajo ($W.$). Algo de calor (q_c) debe transferirse a un depósito frío. Un motor térmico perfecto, en el que todo el calor extraído (q_h) se puede utilizar para realizar el trabajo ($W.$), es imposible según la segunda ley de la termodinámica.



Motor térmico real **Motor térmico perfecto**

por debajo de una tasa de conversión del 100 por ciento. Fueron en parte los esfuerzos de los científicos por comprender esta pérdida de energía lo que los llevó a descubrir la segunda ley de la termodinámica. Clausius se dio cuenta, al igual que Thomson y Rankine, de que el calor fluye en una sola dirección: de lo caliente a lo frío, no de lo frío a lo caliente.

Ayuda externa

En 1850, Clausius escribió su primera declaración de la segunda ley de la termodinámica: "el calor por sí solo no puede fluir de un cuerpo más frío a uno más cálido". Clausius no estaba diciendo que el calor nunca puede fluir del frío al calor, sino que necesita ayuda externa para hacerlo. Necesita realizar trabajo: el efecto de la energía. Así funcionan los frigoríficos modernos. Al igual que los motores térmicos a la inversa, transfieren calor de las regiones frías del interior del dispositivo a las regiones calientes del exterior, haciendo que las regiones frías sean aún más frías. Una transferencia de este tipo requiere trabajo, que es proporcionado por un refrigerante en expansión.

Clausius pronto se dio cuenta de que las implicaciones de un flujo de calor en un solo sentido eran mucho más complejas que Pensé inicialmente. Quedó claro que los motores térmicos están condenados a la ineficiencia. Por más inteligentemente que estén diseñados, algo de energía siempre se escapará en forma de calor, ya sea en forma de fricción, escape (gas o vapor) o radiación, sin realizar ningún trabajo útil.

El trabajo se realiza mediante el flujo de calor de un lugar a otro. Para Clausius y los demás científicos que investigan la termodinámica, pronto quedó claro que si el trabajo se realiza mediante un flujo de calor, debe haber una concentración de energía almacenada en un lugar para iniciar el flujo; un área debe estar más caliente que otra. Sin embargo, si se pierde calor cada vez que se realiza un trabajo, el calor se propaga gradualmente y se disipa. Las concentraciones de calor se vuelven más pequeñas y raras hasta que ya no se puede realizar más trabajo. Energía

una erupción del volcán Sakurajima en Japón transfiere energía térmica desde el interior súper caliente de la Tierra al exterior más frío, lo que demuestra la segunda ley de la termodinámica.

Los suministros disponibles para el trabajo no son inagotables: con el tiempo, todos se reducen a calor y, por tanto, todo tiene una vida útil limitada.

Energía del universo

A principios de la década de 1850, Clausius y Thomson, de forma independiente, comenzaron a especular sobre si la Tierra misma era una máquina térmica con una vida útil finita, y si esto podría ser cierto para todo el universo. En 1852, Thomson especuló que llegaría un momento en el que la energía del sol se agotaría. Las implicaciones de esto para la Tierra significaron que la Tierra debe tener un principio y un fin: un nuevo concepto. Luego, Thomson intentó calcular la edad que debía tener la Tierra calculando el tiempo que habría tardado en enfriarse hasta su temperatura actual, dado el tiempo que el Sol podría generar calor a medida que colapsaba lentamente bajo su propia gravedad.

Los cálculos de Thomson mostraron que la Tierra tenía sólo unos pocos millones de años, lo que lo llevó a un amargo conflicto con geólogos y evolucionistas, que estaban convencidos de que era considerablemente más antigua.

La explicación de la discrepancia es que entonces no se sabía nada sobre la radiactividad y el descubrimiento de Einstein en 1905 de que la materia se puede convertir en energía. Es la energía de la materia la que ha mantenido a la Tierra caliente durante mucho más tiempo que la radiación solar por sí sola. Esto hace retroceder la historia de la Tierra a más de 4 mil millones de años.

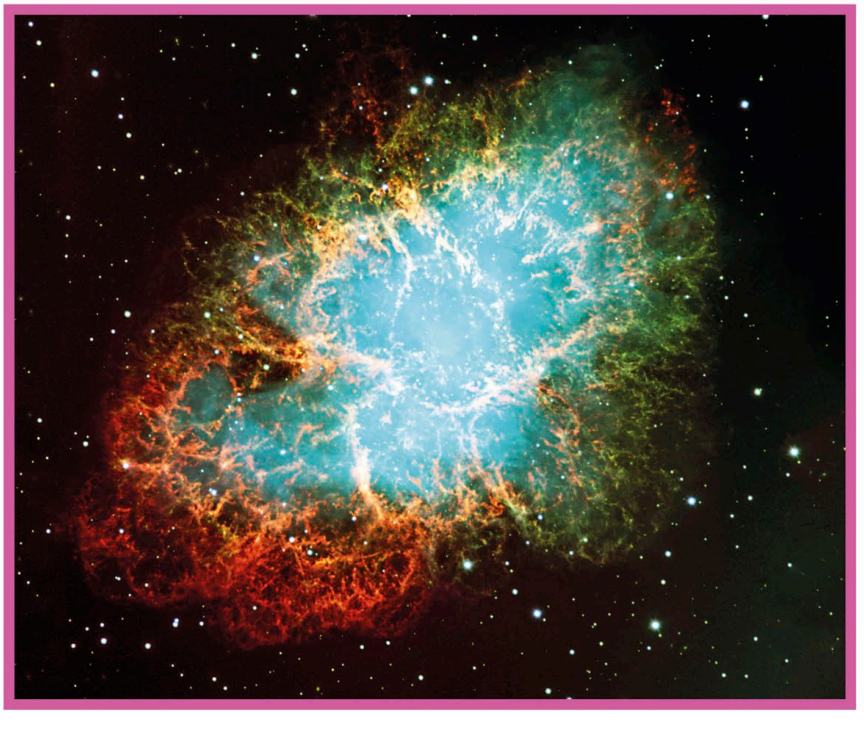
Thomson fue aún más lejos y sugirió que con el tiempo toda la energía del universo se disiparía en forma de calor. Se extendería como una masa uniforme de calor en "equilibrio", sin ninguna concentración de energía. En ese punto, nada más podría cambiar en el universo y efectivamente estaría muerto. Sin embargo, Thomson también afirmó que la teoría de la "muerte por calor" dependía de que hubiera una cantidad finita de materia en el universo, lo que él creía que no era el caso. Por eso, dijo, es

Los procesos dinámicos continuarían. Los cosmólogos ahora saben mucho más sobre el universo de lo que Thomson podría y ya no acepta la teoría de la muerte por calor, aunque el destino final del universo sigue siendo desconocido.

Enunciando la segunda ley

En 1865, Clausius introdujo la palabra "entropía" (acuñada del griego que significa "intrínseco" y "dirección") para resumir el flujo de calor en un solo sentido. El concepto de entropía reunió el trabajo que Clausius, Thomson y Rankine habían estado realizando durante los 15 años anteriores mientras desarrollaban lo que se convertiría en la segunda ley de la entropía.
termodinámica. Sin embargo, la entropía llegó a significar mucho más que un simple flujo en una dirección. A medida que las ideas de Clausius tomaron forma, la entropía se convirtió en una medida matemática de cuánta energía se disipaba.

Clausius argumentó que debido a que se necesita una concentración de energía para mantener la forma y el orden del universo, la disipación conduce a una



Nebulosa del Cangrejo Es una supernova, una estrella que explotó. Según la teoría de la muerte por calor, el calor liberado al espacio por tales explosiones conducirá eventualmente a un equilibrio térmico.

> He formado intencionalmente la palabra entropía para que sea lo más similar posible a la palabra energía.
>
> **Rudolf Clausius**

desorden aleatorio de energía de bajo nivel. Como resultado, la entropía ahora se considera una medida del grado de disipación, o más precisamente del grado de aleatoriedad. Pero Clausius y sus compañeros estaban
hablando específicamente de calor. De hecho, Clausius definió la entropía como una medida del calor que transfiere un cuerpo por unidad de temperatura. Cuando un cuerpo contiene mucho calor pero su temperatura es baja, es necesario disipar el calor.

El destino de todas las cosas.
Clausius resumió su versión de la segunda ley de la termodinámica como "la entropía del universo tiende a un máximo". Debido a que esta redacción es vaga, mucha gente ahora imagina que se aplica a todo. Se ha convertido en una metáfora del destino de todas las cosas, que en última instancia serán consumidas por el caos.

En 1854, sin embargo, Clausius hablaba específicamente de calor y energía. Su definición contenía la primera formulación matemática de la entropía, aunque en ese momento

Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com

Cuando hay un**tienda grande**de **energía térmica interna**, la temperatura es**alto**.

Cuando un sistema tiene**baja energía térmica interna**, la temperatura es**bajo**.

Calor**fluye de caliente**áreas**al frio**áreas.

Calentar naturalmente**se disipa**(se extiende) con el tiempo.

El grado de disipación o entropía de la El universo tiende a un máximo.

lo llamó "valor de equivalencia", con una ecuación para$S$(entropía) para sistemas de energía abiertos y otro para sistemas cerrados. Un sistema energético es una región donde fluye la energía; podría ser el motor de un automóvil o toda la atmósfera. Un sistema abierto puede intercambiar tanto energía como materia con su entorno; un sistema cerrado sólo puede intercambiar energía (como calor o trabajo).

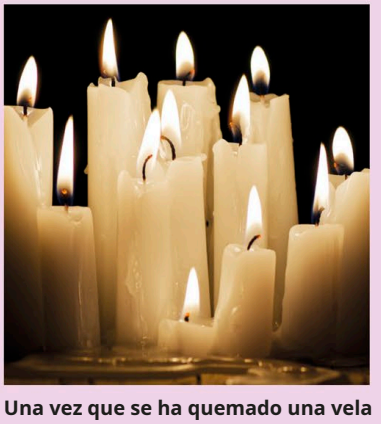
> Dentro de un período de tiempo finito la Tierra volverá a ser inadecuada para la habitación humana.
>
> **William Thomson**

A Thomson se le ocurrió una forma de describir la segunda ley de la termodinámica en relación con los límites de las máquinas térmicas. Esto se convirtió en la base de lo que ahora se conoce como la declaración de la ley de Kelvin-Planck (Lord Kelvin fue el título que tomó Thomson cuando se le dio un título nobiliario en 1892). El físico alemán Max Planck perfeccionó la idea de Kelvin para que dijera: "es imposible idear un motor térmico que funcione cíclicamente, cuyo efecto sea absorber energía en forma de calor de un único depósito térmico y entregar una cantidad equivalente de trabajo". ." En otras palabras, es imposible fabricar un motor térmico que sea 100 por ciento eficiente. No es fácil ver que esto es lo que también decía Clausius, lo que ha causado confusión desde entonces. Esencialmente, todas estas ideas se basan en la misma ley de la termodinámica: la inevitabilidad de la pérdida de calor cuando el calor fluye en una dirección.

La flecha del tiempo

A menudo se pasa por alto la importancia del descubrimiento de la segunda ley de la termodinámica, porque otros científicos rápidamente se basaron en el trabajo de Clausius y sus colegas. De hecho, la segunda ley de la termodinámica es tan crucial para la física como el descubrimiento de las leyes del movimiento por parte de Newton, y jugó un papel clave en la modificación de la visión newtoniana del universo que había prevalecido hasta entonces.

En el universo de Newton, todas las acciones ocurren por igual en todas las direcciones, por lo que el tiempo no tiene dirección, como un mecanismo eterno que puede funcionar hacia adelante o hacia atrás. La segunda ley de la termodinámica de Clausius anuló esta opinión. Si el calor fluye en una dirección, también debe hacerlo el tiempo. Las cosas decaen, se agotan, llegan a su fin, y la flecha del tiempo apunta en una sola dirección: hacia el final. Las implicaciones de este descubrimiento sacudieron a muchas personas de fe religiosa que creían que el universo era eterno.

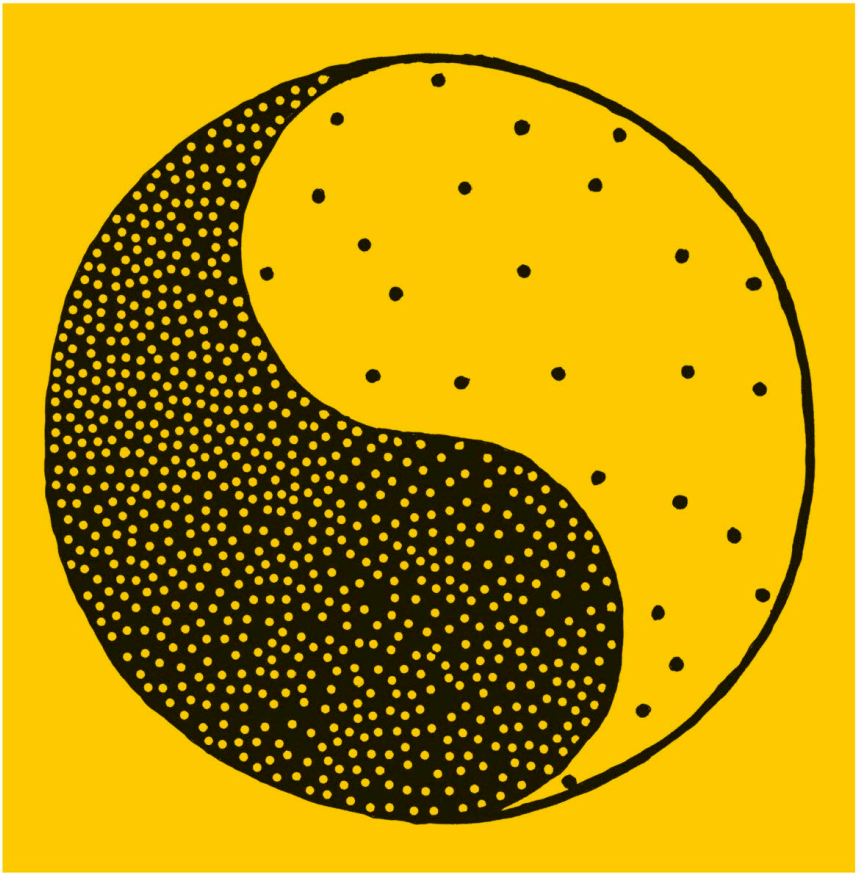


Una vez que se ha quemado una vela, la cera quemada no se puede restaurar. La flecha termodinámica del tiempo apunta en una dirección: hacia el final.

EL FLUIDO Y SU VAPOR

CONVERTIRSE EN UNO

CAMBIOS DE ESTADO Y FORMACIÓN DE BONOS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE

Johannes Diderik Van der Waals(1837-1923)

ANTES

C. 75antes de Cristo El pensador romano Lucrecio sugiere que los líquidos están formados por átomos redondos y lisos, pero que los sólidos están unidos por átomos en forma de gancho.

1704 Isaac Newton teoriza que los átomos se mantienen unidos por una fuerza invisible de atracción.

1869 El químico y físico irlandés Thomas Andrews descubre la continuidad entre los dos estados fluidos de la materia: líquido y gaseoso.

DESPUÉS

1898 El químico escocés James Dewar licúa el hidrógeno.

1908 La física holandesa Heike Kamerlingh Onnes licúa helio.

Se sabe desde hace mucho tiempo que la misma sustancia puede existir en al menos tres fases: sólida, líquida y gaseosa. El agua, por ejemplo, puede ser hielo, agua líquida y vapor. Pero lo que estaba sucediendo en los cambios entre estas fases pareció durante gran parte del siglo XIX presentar un obstáculo a las leyes de los gases que se habían establecido a finales del siglo XVIII.

Se prestó especial atención a los dos estados fluidos: líquido y gaseoso. En ambos estados, la sustancia fluye para adoptar la forma de cualquier recipiente y no puede mantener su propia forma como un sólido. Los científicos habían demostrado que si un gas se comprime cada vez más, su presión no disminuye.

Ver también: Modelos de materia 68–71 · Fluidos 76–79 · Calor y transferencias 80–81 · Las leyes de los gases 82–85 · La entropía y la segunda ley de la termodinámica 94–99 · El desarrollo de la mecánica estadística 104-111

> ¿Cómo voy a nombrar este punto? en el cual el fluido y su vapor se vuelven uno según a una ley de continuidad?
>
> **Michael Faraday**
>
> **En una carta a un colega científico, William Whewell (1844)**

aumenta indefinidamente y eventualmente se vuelve líquido. De manera similar, si se calienta un líquido, al principio se evapora una pequeña parte y luego, finalmente, se evapora todo. El punto de ebullición del agua (la temperatura máxima que puede alcanzar) se mide fácilmente y aumenta de manera mensurable bajo presión, que es el principio detrás de una olla a presión.

Los puntos de cambio

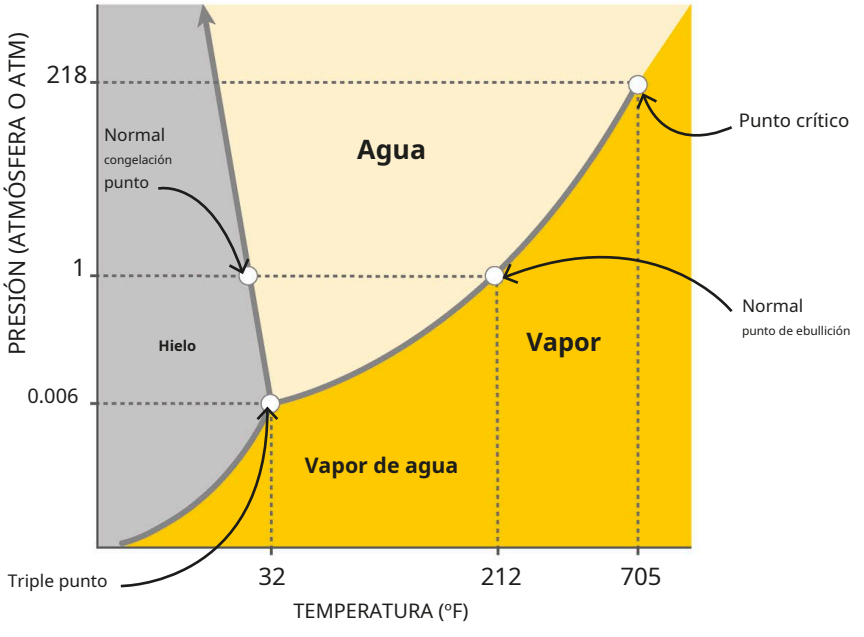
Los científicos querían ir más allá de estas observaciones para saber qué sucede dentro de una sustancia cuando el líquido se convierte en gas. En 1822, el ingeniero y físico francés barón Charles Cagniard de la Tour experimentó con un "digestor de vapor", un dispositivo presurizado que generaba vapor a partir de agua calentada más allá de su punto de ebullición normal. Llenó parcialmente el cilindro digestor con agua y dejó caer en él una bola de pedernal. Al hacer rodar el cilindro como si fuera un tronco, podía oír la bola chapotear al tocar el agua. Luego, el cilindro se calentó a una temperatura estimada por De la Tour en 683,6 °F.

(362°C), momento en el que no se oyó ninguna salpicadura. La frontera entre el gas y el líquido desapareció.

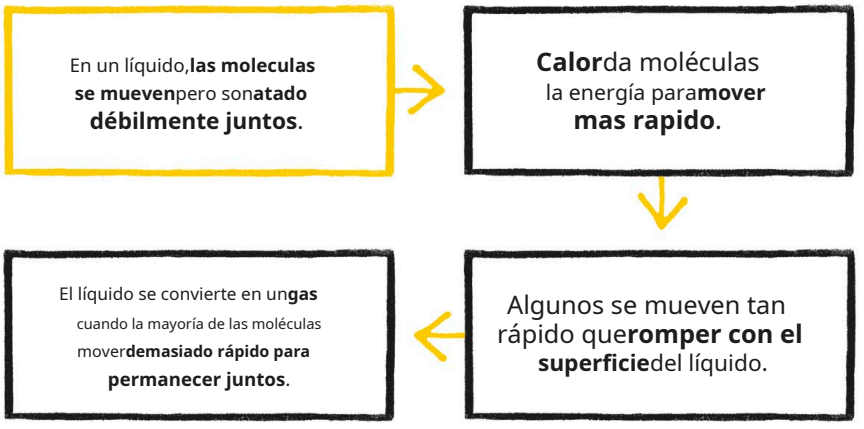
Se sabía que mantener un líquido bajo presión puede evitar que todo se convierta en gas, pero los experimentos de De la Tour revelaron que hay una temperatura a la que un líquido siempre se convertirá en gas, sin importar a cuánta presión se le someta. A esta temperatura, no hay distinción entre la fase líquida y la fase gaseosa: ambas se vuelven igualmente densas. Al disminuir la temperatura se restablecen las diferencias entre las fases.

El punto en el que el líquido y el gas están en equilibrio siguió siendo un concepto vago hasta la década de 1860, cuando el físico Thomas Andrews investigó el fenómeno. Estudió la relación entre temperatura, presión y volumen, y cómo podría afectar las fases de una sustancia. En 1869, describió experimentos en los que atrapó dióxido de carbono sobre mercurio en un tubo de vidrio. Al empujar el mercurio hacia arriba, pudo aumentar la presión del gas hasta convertirlo en líquido. Sin embargo, nunca se licuaría por encima de los 32,92 °C (91,26 °F), sin importar cuánta presión aplicara. Llamó a esta temperatura el "punto crítico" del dióxido de carbono. Andrews observó además: "Hemos visto que las fases gaseosa y líquida son esencialmente sólo etapas distintas de un mismo estado de la materia y que pueden unirse entre sí mediante un cambio continuo".

La idea de la continuidad entre las fases líquida y gaseosa fue una idea clave, destacando--



Un diagrama de fases traza la temperatura y presión a las que una sustancia (en este caso, agua) es sólida, líquida o gaseosa. En el "punto triple", una sustancia puede existir simultáneamente como sólido, líquido y gas. En el punto crítico, un líquido y su gas se vuelven idénticos.



su similitud fundamental. Sin embargo, lo que aún estaba por descubrir eran las fuerzas que se esconden detrás de estas diferentes fases de la materia y cómo interactúan.

Lazos moleculares

A principios del siglo XIX, el científico británico Thomas Young sugirió que la superficie de un líquido se mantiene unida mediante enlaces intermoleculares. Es esta "tensión superficial" la que convierte el agua en gotas y forma una curva en la parte superior de un vaso de agua, a medida que las moléculas se juntan. Este trabajo fue llevado más allá por el físico holandés Johannes Diderik van der Waals, quien observó lo que sucedía cuando la tensión superficial se rompía y permitía que las moléculas se separaran, convirtiendo el agua líquida en vapor de agua.

Van der Waals propuso que el cambio de estado es parte de un continuo y no una ruptura clara entre líquido y gas. Existe una capa de transición en la que el agua no es exclusivamente líquida ni gaseosa. Encontró que a medida que aumenta la temperatura, la tensión superficial disminuye y, a la temperatura crítica, la tensión superficial desaparece por completo, permitiendo que la capa de transición se vuelva infinitamente gruesa. Van der Waals luego, gradualmente desarrolló una "ecuación de estado" clave para describir matemáticamente el comportamiento de los gases y su condensación a líquido, que podría aplicarse a diferentes sustancias.

El trabajo de Van der Waals ayudó a establecer la realidad de las moléculas e identificar enlaces intermoleculares. Estos son mucho más débiles que los enlaces entre átomos, que se basan en poderosas fuerzas electrostáticas. Las moléculas de la misma sustancia se mantienen unidas de manera diferente, tanto en la fase líquida como en la gaseosa. Por ejemplo, los enlaces que unen las moléculas de agua no son los mismos que los enlaces que unen los átomos de oxígeno e hidrógeno dentro de cada molécula de agua.

Cuando un líquido se convierte en gas, es necesario superar las fuerzas entre las moléculas para permitir que esas moléculas se muevan libremente. El calor proporciona la energía para hacer vibrar las moléculas. Una vez el Las vibraciones son lo suficientemente poderosas, las moléculas se liberan de las fuerzas que las unen y se convierten en gas.

Fuerzas de atracción

Tres fuerzas clave de atracción intermolecular (dipolo-dipolo, dispersión de London y enlace de hidrógeno) se conocen colectivamente como fuerzas de Van der Waals. Dipolo-dipolo

Las fuerzas ocurren en moléculas "polares", donde los electrones se comparten de manera desigual entre los átomos de la molécula. En el ácido clorhídrico, por ejemplo, el átomo de cloro tiene un electrón extra, tomado del átomo de hidrógeno. Esto le da a la parte de cloro de la molécula una ligera carga negativa, a diferencia de la parte de hidrógeno. El resultado es que en una solución líquida de ácido clorhídrico, los lados negativos de algunas moléculas son atraídos por los lados positivos de otras, lo que las une.

La fuerza de dispersión de London (llamada así en honor al científico alemán-estadounidense Fritz London, quien la reconoció por primera vez en 1930) ocurre entre moléculas no polares. Por ejemplo, en el cloro gaseoso, los dos átomos de cada molécula tienen la misma carga en ambos lados. Pero los electrones de un átomo se mueven constantemente. Esto significa que un lado de la molécula puede volverse brevemente negativo mientras que el otro se vuelve brevemente positivo, por lo que los enlaces dentro de las moléculas se forman y reforman constantemente.

La tercera fuerza, el enlace de hidrógeno, es un tipo especial de enlace dipolodipolo que se produce dentro del hidrógeno. Es la interacción entre un átomo de hidrógeno y un átomo de oxígeno, flúor o nitrógeno. Es especialmente fuerte para un enlace intermolecular porque

> Estaba bastante convencido de la existencia real de las moléculas.
>
> **Johannes Diderik Van der Waals**

Los átomos de oxígeno, flúor y nitrógeno son fuertes atractores de electrones, mientras que el hidrógeno es propenso a perderlos. Entonces, una molécula que los combina se vuelve fuertemente polar, creando, por ejemplo, los enlaces de hidrógeno robustos que retienen el agua (H_2O) juntos.

Los enlaces de dispersión son las más débiles de las fuerzas de Van der Waals. Algunos elementos que están unidos por ellos, como el cloro y el flúor, permanecen como gas a menos que se enfríen a una temperatura extremadamente baja (-306,4 °F [-188 °C] y -302,8 °F [-186 °C] respectivamente). , cuando los enlaces se vuelven lo suficientemente fuertes como para entrar en la fase líquida. Los enlaces de hidrógeno son los más fuertes, razón por la cual el agua tiene un punto de ebullición inusualmente alto para una sustancia compuesta de oxígeno e hidrógeno.

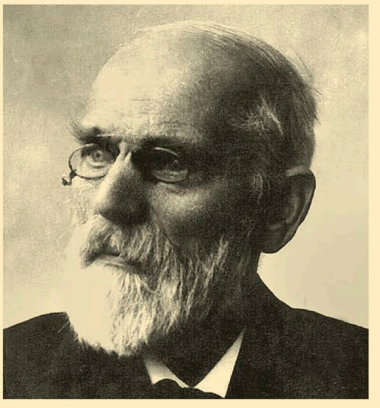
Descubrimientos críticos

Al demostrar que las fuerzas de atracción entre las moléculas de gas no eran cero sino que podían forzarse, bajo presión, a formar enlaces que cambiaban de estado, van der Waals sentó las bases para la comprensión de cómo los líquidos se transforman en gases.

> No cabe duda de que el nombre de van der Waals pronto estará entre los más destacados de la ciencia molecular.
>
> **James Clerk Maxwell**

y de regreso. Su "ecuación de estado" permitió encontrar puntos críticos para una variedad de sustancias, permitiendo licuar gases como el oxígeno, el nitrógeno y el helio. También condujo al descubrimiento de superconductores, sustancias que pierden toda resistencia eléctrica cuando se enfrían a temperaturas ultrabajas.

En una planta de oxígeno líquido, el oxígeno gaseoso se extrae del aire en columnas de separación y se enfría pasando a través de intercambiadores de calor hasta su temperatura de licuefacción de -302,8°F (-186°C).



Johannes Diderik van der Waals

Nacido hijo de un carpintero en la ciudad holandesa de Leiden en 1837, Johannes Diderik van der Waals carecía de escolarización suficiente para acceder a la educación superior. Se convirtió en profesor de matemáticas y física y estudió a tiempo parcial.
en la Universidad de Leiden, y finalmente obtuvo su doctorado (en atracción molecular) en 1873.

Van der Waals fue inmediatamente aclamado como uno de los principales físicos de la época y en 1876 se convirtió en profesor de Física en la Universidad de Ámsterdam. El permaneció allí por el resto de su carrera, hasta que lo sucedió como profesor su hijo, también llamado Juan. En 1910, Van der Waals recibió el Premio Nobel de Física "por su trabajo sobre la ecuación de estado de gases y líquidos". Murió en Ámsterdam en 1923.

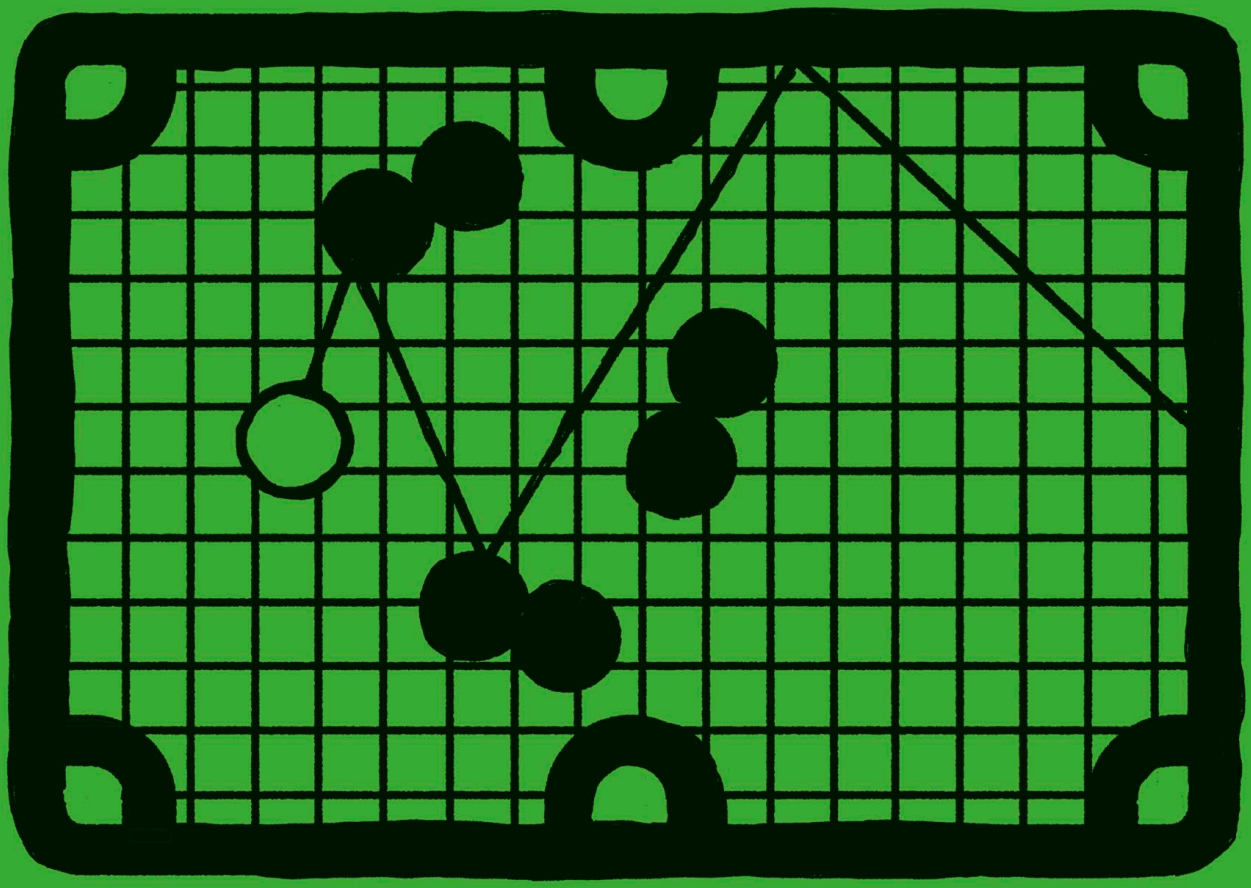
Trabajos clave

1873 *Sobre la continuidad del estado gaseoso y líquido* **1880** *Ley de los Estados Correspondientes*

1890 *Teoría de las soluciones binarias*

Chocando BOLAS DE BILLAR EN UNA CAJA

EL DESARROLLO DE MECÁNICA ESTADÍSTICA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

ANTES
1738 Daniel Bernoulli realiza el primer análisis estadístico del movimiento de partículas.

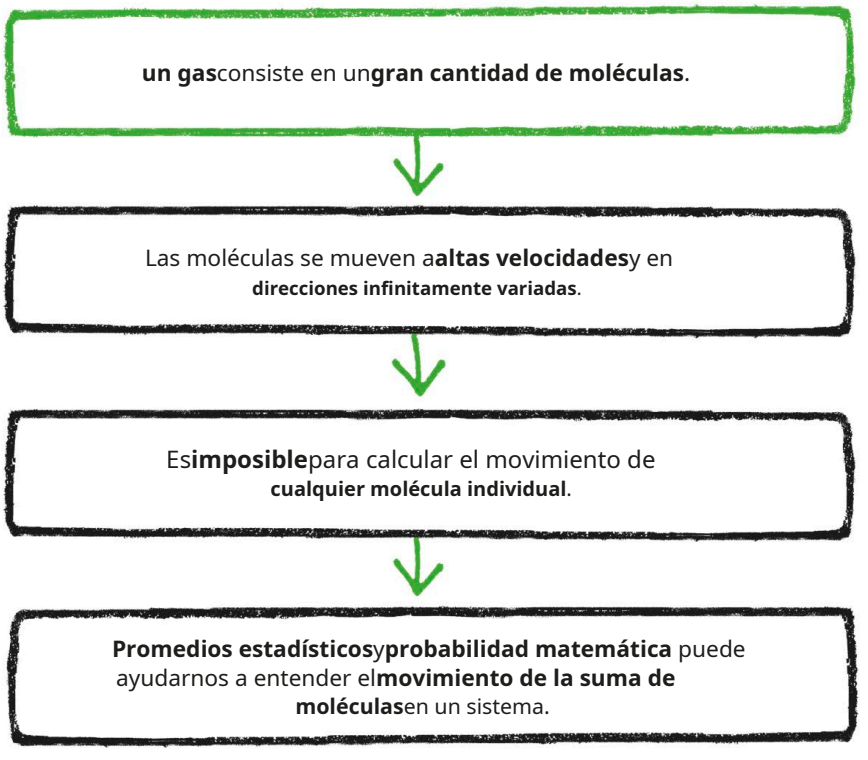
1821 John Herapath da la primera afirmación clara de la teoría cinética.

1845 John Waterston calcula el promedio
Velocidad de las moléculas de gas.

1859 James Clerk Maxwell expone su teoría cinética.

DESPUÉS
1902 Willard Gibbs publica el primer libro de texto importante sobre mecánica estadística.

1905marian von Smoluchowski y Albert Einstein demuestran
El movimiento browniano como mecánica estadística en acción.



La idea de que las propiedades de la materia (y en particular, de los gases) dependen del comportamiento de los átomos y las moléculas se acepta ahora como un hecho científico. Pero esta teoría tardó en ganar aceptación y siguió siendo objeto de amargas disputas, especialmente en el siglo XIX. Varios pioneros se enfrentaron, en el mejor de los casos, al abandono y, en el peor, al escarnio, y pasó mucho tiempo antes de que la "teoría cinética" (la idea de que el calor es el movimiento rápido de las moléculas) fuera verdaderamente aceptada.

En el siglo XVII, Robert Boyle demostró que el aire es elástico y se expande y contrae. Él especuló que esto podría deberse a que el aire está compuesto de partículas que se repelen entre sí, a la manera de un resorte. Isaac Newton demostró matemáticamente que si la "elasticidad" del aire (su presión) proviene de la repulsión de partículas, entonces la fuerza repulsiva debe ser inversamente proporcional a las distancias entre las partículas. Pero Newton creía que las partículas estaban fijas en un lugar y vibraban en el lugar.

Gases y calor

El matemático suizo Daniel Bernoulli hizo la primera propuesta seria de la teoría cinética (movimiento) de los gases en 1738. Antes de esa fecha, los científicos ya sabían que el aire ejercía presión; por ejemplo, presión suficiente para sostener una pesada columna de mercurio, que había demostrado por el barómetro de Evangelista Torricelli en la década de 1640. La explicación aceptada era que el aire estaba hecho de partículas, que en ese momento se pensaba que flotaban en una sustancia invisible llamada "éter".

Inspirado por la reciente invención de la máquina de vapor, Bernoulli propuso una idea radicalmente nueva. Pidió a sus lectores que imaginaran una

> Vivimos sumergidos en el fondo de un océano del elemento aire.
> **Evangelista Torricelli**

Ver también: Energía cinética y energía potencial 54 · Fluidos 76–79 · Motores térmicos 90–93 · Entropía y segunda ley de la termodinámica 94–99

> Una teoría bien construida
> Es en algunos aspectos sin duda una producción artística. Un buen ejemplo es La famosa teoría cinética.
> **Ernesto Rutherford**

pistón dentro de un cilindro, que contenía partículas diminutas y redondas que se movían de un lado a otro. Bernoulli argumentó que cuando las partículas chocaban con el pistón, creaban presión. Si el aire se calentara, las partículas se acelerarían, golpeando el pistón con más frecuencia y empujándolo hacia arriba a través del cilindro. Su propuesta resumía la teoría cinética de los gases y el calor, pero sus ideas fueron olvidadas porque primero la teoría de que los materiales combustibles contienen un elemento fuego llamado flogisto, luego la teoría calórica (que el calor es una especie de fluido) prevaleció durante los siguientes 130 años. años, hasta que el análisis estadístico de Ludwig Boltzmann en 1868 lo desterró para siempre.

Calor y movimiento

También hubo otros pioneros no reconocidos, como el erudito ruso Mikhail Lomonosov, quien en 1745 argumentó que el calor es una medida del movimiento de las partículas, es decir, la teoría cinética del calor. Continuó diciendo que el cero absoluto se alcanzaría cuando las partículas dejaran de moverse, más de un siglo antes de que William Thomson (más tarde Lord Kelvin, quien sería recordado para siempre en la escala de temperatura Kelvin) llegó a la misma conclusión en 1848.

Fue en 1821 cuando el físico británico John Herapath hizo la primera exposición clara de la teoría cinética. El calor todavía se consideraba un fluido y los gases estaban formados por partículas repelentes, como había sugerido Newton. Pero Herapath rechazó esta idea y sugirió, en cambio, que los gases están formados por "átomos que chocan mutuamente". Si tales partículas fueran infinitamente pequeñas, razonó, las colisiones aumentarían a medida que se comprimiera el gas, por lo que la presión aumentaría y se generaría calor. Desafortunadamente, el trabajo de Herapath fue rechazado por la Royal Society de Londres por considerarlo demasiado conceptual y no probado.

En 1845, la Royal Society también rechazó un importante artículo sobre teoría cinética del escocés John Waterston, que utilizaba reglas estadísticas para explicar cómo se distribuye la energía entre los átomos y moléculas del gas. Waterston entendió que no todas las moléculas se mueven a la misma velocidad, sino que viajan a un rango de velocidades diferentes alrededor de un promedio estadístico. Al igual que Herapath antes que él, la importante contribución de Waterston fue descuidada y la Royal Society perdió la única copia de su innovador trabajo. Fue redescubierto en 1891, pero para entonces Waterston había desaparecido y se presumía que se había ahogado en un canal cerca de su casa en Edimburgo.

universo desordenado

El trabajo de Waterston fue especialmente significativo porque fue la primera vez que la física rechazó el mecanismo de relojería perfecto del universo newtoniano. En cambio, Waterston fue

movimiento browniano

En 1827, el botánico escocés Robert Brown describió el movimiento aleatorio de los granos de polen suspendidos en el agua. Aunque no fue el primero en notar este fenómeno, sí fue el primero en estudiarlo en detalle. Más investigaciones demostraron que los pequeños movimientos de vaivén de los granos de polen se hacían más rápidos a medida que aumentaba la temperatura del líquido.

La existencia de átomos y moléculas todavía era un tema de acalorado debate a principios del siglo XX, pero en 1905 Einstein argumentó que el movimiento browniano podía explicarse mediante átomos y moléculas invisibles. bombardeando las pequeñas pero visibles partículas suspendidas en un líquido, haciéndolas vibrar hacia adelante y hacia atrás. Un año después, el físico polaco Marian Smoluchowski publicó una teoría similar y en 1908 el francés Jean Baptiste Perrin realizó experimentos que confirmaron esta teoría.

movimiento browniano La formación de partículas en un fluido resulta de colisiones con moléculas del fluido que se mueven rápidamente. Finalmente se explicó mediante mecánica estadística.

mirando valores cuyo rango era tan desordenado que sólo podían considerarse en términos de promedios estadísticos y probabilidades, no de certezas. Aunque el trabajo de Waterston fue inicialmente rechazado, la idea de entender el gas y el calor en términos de movimientos a alta velocidad de partículas diminutas finalmente comenzaba a afianzarse. El trabajo de los físicos británicos James Joule y William Thomson, el físico alemán Rudolf Clausius y otros demostraba que el calor y el movimiento mecánico son formas intercambiables de energía, lo que hace que

Es redundante la idea de que el calor sea una especie de "fluido calórico".

movimiento molecular

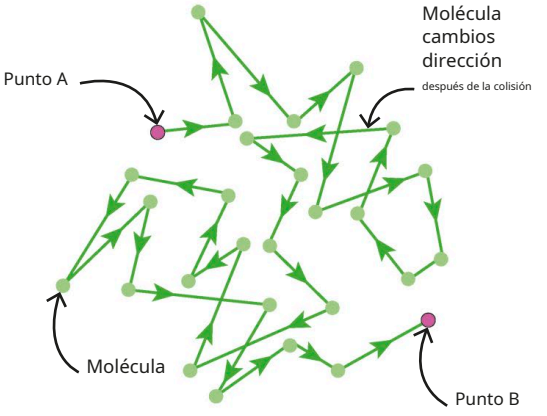
Joule había calculado las altísimas velocidades de las moléculas de gas con cierta precisión en 1847, pero supuso que todas se movían a la misma velocidad. Diez años más tarde, Clausius impulsó la comprensión con su propuesta de un "camino libre y mediocre". Según él, las moléculas chocan y rebotan repetidamente entre sí en diferentes direcciones. El camino libre medio es la distancia promedio que recorre cada molécula antes de chocar con otra. Clausius calculó que esto era apenas una millonésima de milímetro a temperatura ambiente.

> La energía disponible es el principal objeto en juego en la lucha por la existencia y la evolución del mundo.
> **Ludwig Boltzmann**

una molecula de gaschoca repetidamente con otros moléculas, provocando que cambie de dirección. El

La molécula que se muestra aquí tiene 25 colisiones de este tipo, y la distancia promedio que recorre entre cada una.

La colisión es lo que Rudolf Clausius llamó su "camino libre medio". Compara la distancia más corta entre el punto A y el punto B con la distancia realmente recorrida.



temperatura, lo que significa que cada molécula choca con otra más de 8 mil millones de veces por segundo. Es la pequeñez y la frecuencia de estas colisiones lo que hace que un gas parezca fluido y suave, en lugar de un mar embravecido.

Al cabo de unos años, James Clerk Maxwell proporcionó una exposición tan sólida de la teoría cinética que finalmente obtuvo una aceptación más amplia. Significativamente, en 1859, Maxwell introdujo la primera ley estadística en física, la Ley de Maxwell. distribución, que muestra la proporción probable de moléculas que se mueven a una velocidad particular en un gas ideal. Maxwell también estableció que la velocidad de las colisiones moleculares corresponde a la temperatura: cuanto más frecuentes son las colisiones, mayor es la temperatura. En 1873, Maxwell estimó que hay 19 billones de moléculas en un centímetro cúbico de gas en condiciones ideales, no muy lejos de la estimación moderna de 26,9 billones.

Maxwell también comparó análisis molecular a la ciencia de las estadísticas de población, que dividía a las personas según factores como la educación, el color del cabello y la constitución, y las analizaba para determinar las características promedio. Maxwell observó que la enorme población de átomos en tan sólo un centímetro cúbico de hecho, los tipos de gas son mucho menos variados, lo que simplifica mucho la tarea estadística de analizarlos.

El avance de Boltzmann

La figura clave en el desarrollo del análisis estadístico de moléculas en movimiento fue el físico austriaco Ludwig Boltzmann. En importantes artículos de 1868 y 1877, Boltzmann desarrolló el enfoque estadístico de Maxwell hasta convertirlo en toda una rama de la ciencia: la mecánica estadística. Sorprendentemente, esta nueva disciplina permitió explicar y predecir las propiedades de los gases y el calor en términos mecánicos simples, como masa, momento y velocidad. Estas partículas, aunque pequeñas, se comportaron de acuerdo con las leyes del movimiento de Newton, y la variedad en su movimiento se debe simplemente al azar. Calor, que tenía

Anteriormente se pensaba que era un fluido misterioso e intangible conocido como "calórico", pero ahora podría entenderse como el movimiento de partículas a alta velocidad, un fenómeno enteramente mecánico.

Boltzmann enfrentó un desafío particular al probar su teoría: las moléculas son tan innumerables y tan pequeñas que hacer cálculos individuales sería imposible. Más significativamente, sus movimientos varían enormemente en velocidad e infinitamente

en dirección. Boltzmann se dio cuenta de que la única manera de investigar la idea de forma rigurosa y práctica era emplear las matemáticas de la estadística y la probabilidad. Se vio obligado a renunciar a las certezas y la precisión del mundo mecánico de Newton y a entrar en el mundo mucho más confuso de las estadísticas y los promedios.

Microestados y macroestados

La ley de conservación de la energía establece que la energía total (mi) en un volumen aislado de gas debe ser constante. Sin embargo, la energía de las moléculas individuales puede variar. Entonces, la energía de cada molécula no puede ser mi dividido por el número total de moléculas (mi/norte), 19 billones, por ejemplo, como sería si todos tuvieran la misma energía. En cambio, Boltzmann examinó el rango de energías posibles que podrían tener las moléculas individuales, considerando factores como su posición y velocidad. Boltzmann llamó a este rango de energías un "microestado".

A medida que interactúan los átomos dentro de cada molécula, el microestado cambia muchos billones de veces por segundo, pero la condición general del gas (su presión, temperatura y volumen, que Boltzmann llamó a su "macroestado"— permanece estable. Boltzmann se dio cuenta de que se puede calcular un macroestado promediando los microestados.

Para promediar los microestados que componen el macroestado, Boltzmann tuvo que suponer que todos los microestados son igualmente probables. Justificó esta suposición con lo que se conoció como la "hipótesis ergódica": que durante un período de tiempo muy largo, cualquier sistema dinámico pasará, en promedio, la misma cantidad de tiempo en cada microestado. Esta idea de que las cosas promediaran era vital para el pensamiento de Boltzmann.

Termodinámica estadística

El enfoque estadístico de Boltzmann ha tenido enormes ramificaciones. Se ha convertido en el principal medio para comprender el calor y la energía, e hizo de la termodinámica (el estudio de las relaciones entre el calor y otras formas de energía) un pilar central de la física. Su enfoque también se convirtió en una forma enormemente valiosa de examinar el mundo subatómico, allanando el camino para el desarrollo de la ciencia cuántica, y ahora sustenta gran parte de la tecnología moderna.

> Tengamos libre alcance para todas las direcciones. de investigación; lejos del dogmatismo, ya sea atomista o anti-atomista.
> **Ludwig Boltzmann**

Los científicos ahora entienden que el mundo subatómico puede explorarse a través de probabilidades y promedios, no sólo como una manera de entenderlo o medirlo, sino como una vislumbre de su realidad misma: el mundo aparentemente sólido en el que vivimos es esencialmente un mar de probabilidades subatómicas. Sin embargo, allá por la década de 1870, Boltzmann enfrentó una tenaz oposición a sus ideas cuando expuso los fundamentos matemáticos de la termodinámica. Escribió dos artículos clave sobre la segunda ley de la termodinámica (anteriormente

Ludwig Boltzmann

Nacido en Viena en 1844, en el apogeo del Imperio austrohúngaro, Ludwig Boltzmann estudió física en la Universidad de Viena y escribió su tesis doctoral sobre la teoría cinética de los gases. A la edad de 25 años, se convirtió en profesor en la Universidad de Graz y luego ocupó puestos docentes en Viena y Munich antes de regresar a Graz. En 1900 se trasladó a la Universidad de Leipzig para escapar de su amarga

su rival de largo plazo, Ernst Mach.

Fue en Graz donde Boltzmann completó su trabajo sobre mecánica estadística. Él estableció el

Teoría cinética de los gases y fundamento matemático de la termodinámica en relación con los probables movimientos de los átomos. Sus ideas le trajeron oponentes y sufrió ataques de depresión. Se suicidó en 1906.

Trabajos clave

1871 Documento sobre la distribución Maxwell-Boltzmann
1877 Documento sobre la segunda ley de la termodinámica y la probabilidad ("Sobre la relación entre el segundo fundamental")

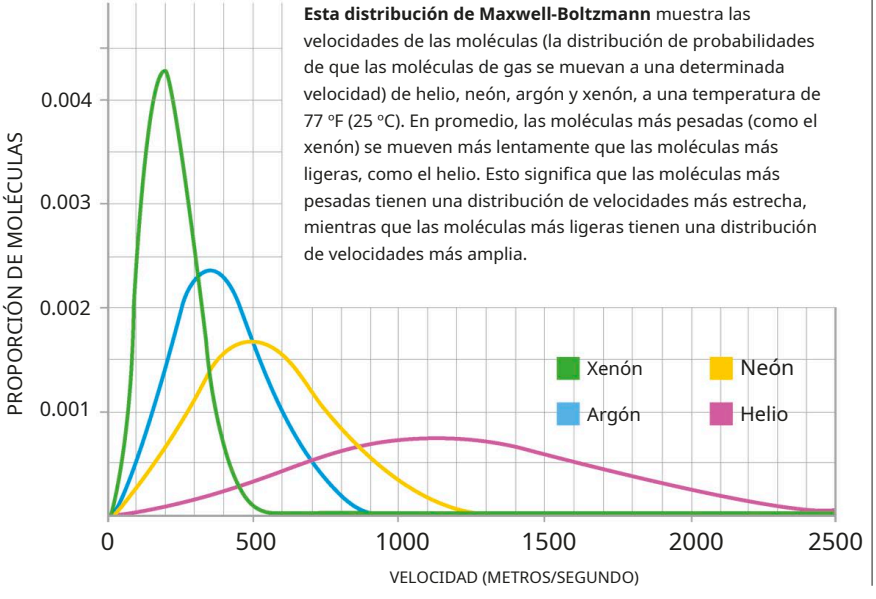
desarrollado por Rudolf Clausius, William Thomson y William Rankine), que muestra que el calor fluye sólo en una dirección, de lo caliente a lo frío, no de lo frío a lo caliente. Boltzmann explicó que la ley podría entenderse precisamente aplicando tanto las leyes básicas de la mecánica (es decir, las leyes del movimiento de Newton) como la teoría de la probabilidad al movimiento de los átomos.

En otras palabras, la segunda ley de la termodinámica es una ley estadística. Afirma que un sistema tiende al equilibrio, o máxima entropía (el estado de mayor desorden de un sistema físico), porque éste es, con mucho, el resultado más probable del movimiento atómico; las cosas se promedian con el tiempo. En 1871, Boltzmann también había desarrollado la teoría de Maxwell.

ley de distribución de 1859 en una regla que define la distribución de velocidades de las moléculas de un gas a una determinada temperatura. La distribución resultante de Maxwell-Boltzmann es fundamental para la teoría cinética de los gases. Puede usarse para mostrar la velocidad promedio de las moléculas y también para mostrar la velocidad más probable. La distribución destaca la "equipartición" de la energía, que muestra que la energía de los átomos en movimiento es, en promedio, la misma en cualquier dirección.

negación atómica

El enfoque de Boltzmann era un concepto tan novedoso que enfrentó una feroz oposición por parte de algunos de sus contemporáneos. Muchos consideraron que sus ideas eran fantasiosas y es posible que la hostilidad hacia su trabajo contribuyó a su eventual suicidio. Una de las razones de tal oposición fue que muchos científicos de la época no estaban convencidos de la existencia de los átomos. Algunos, incluido el físico austriaco Ernst Mach, un feroz rival de Boltzmann y conocido por su trabajo sobre las ondas de choque, creían que los científicos sólo debían aceptar lo que podían observar directamente y que los átomos no podían verse en ese momento.



Esta distribución de Maxwell-Boltzmann muestra las velocidades de las moléculas (la distribución de probabilidades de que las moléculas de gas se muevan a una determinada velocidad) de helio, neón, argón y xenón, a una temperatura de 77 °F (25 °C). En promedio, las moléculas más pesadas (como el xenón) se mueven más lentamente que las moléculas más ligeras, como el helio. Esto significa que las moléculas más pesadas tienen una distribución de velocidades más estrecha, mientras que las moléculas más ligeras tienen una distribución de velocidades más amplia.

La Feria Mundial de St. Louis En 1904 Boltzmann dio una conferencia sobre matemáticas aplicadas. Su gira americana también incluyó visitas a las universidades de Stanford y Berkeley.

La mayoría de los científicos sólo aceptaron la existencia de los átomos después de las contribuciones de Albert Einstein y del físico polaco Marian Smoluchowski. Trabajando de forma independiente, exploraron el movimiento browniano, el inexplicable movimiento aleatorio de un lado a otro de pequeñas partículas suspendidas en un fluido. En 1905, Einstein, y al año siguiente, Smoluchowski, demostraron que podía explicarse mediante la mecánica estadística como resultado de las colisiones de las partículas con las moléculas de rápido movimiento del propio fluido.

Mayor aceptación

Aunque era un profesor brillante muy querido por sus alumnos, Boltzmann no alcanzó una mayor popularidad por su trabajo, tal vez porque no lo promovió. La amplia aceptación de su enfoque teórico se debió en parte al físico estadounidense

Willard Gibbs, quien escribió el primer libro de texto importante sobre el tema, *Mecánica estadística*, en 1902.

Fue Gibbs quien acuñó la frase "mecánica estadística" para resumir el estudio del movimiento mecánico de partículas. También introdujo la idea de un "conjunto", un conjunto de microestados comparables que se combinan para formar un macroestado similar. Esto se convirtió en una idea central de la termodinámica y también tiene aplicaciones en otras áreas de la ciencia, que van desde el estudio de las vías neuronales hasta la predicción del tiempo.

Vindicación final

Gracias a Gibbs, Boltzmann fue invitado a una gira de conferencias por Estados Unidos en 1904. En ese momento, la hostilidad hacia la obra de su vida comenzaba a pasar factura. Tenía antecedentes médicos de trastorno bipolar y en 1906 se ahorcó mientras estaba de vacaciones familiares en Trieste, Italia. En un amargo giro del destino, su muerte se produjo el mismo año en que el trabajo de Einstein y Smoluchowski estaba ganando aceptación, reivindicando a Boltzmann. Su idea general era que

> ¿Átomos?
> Tiene
> ¿Ya has visto uno?
> **Ernst Mach**

La materia, y todas las cosas complejas, están sujetas a probabilidad y entropía. Es imposible sobreestimar el inmenso cambio de perspectiva que sus ideas crearon entre los físicos. Las certezas de la física newtoniana habían sido reemplazadas por una visión del universo en la que sólo hay un mar burbujeante de probabilidades, y las únicas certezas son la decadencia y el desorden.

Un tornado Es un sistema caótico que puede analizarse mediante mecánica estadística. Proyectar la distribución de las moléculas atmosféricas puede ayudar a medir su temperatura e intensidad.

Pronóstico del tiempo

Los métodos desarrollados En mecánica estadística para analizar y predecir movimientos masivos de partículas se han utilizado en muchas situaciones más allá de la termodinámica.

Una aplicación del mundo real, por ejemplo, es el cálculo del tiempo "conjunto" previsiones. Los métodos más convencionales de pronóstico meteorológico numérico implican recopilar datos de estaciones e instrumentos meteorológicos de todo el mundo y utilizarlos para simular condiciones climáticas futuras. Por el contrario, la predicción por conjuntos se basa en un gran número de posibles predicciones meteorológicas futuras, en lugar de en un único resultado previsto. La probabilidad de que un solo pronóstico sea incorrecto es relativamente alto, pero los pronosticadores pueden tener un alto grado de confianza en que el tiempo estará dentro de un rango determinado de un pronóstico conjunto.

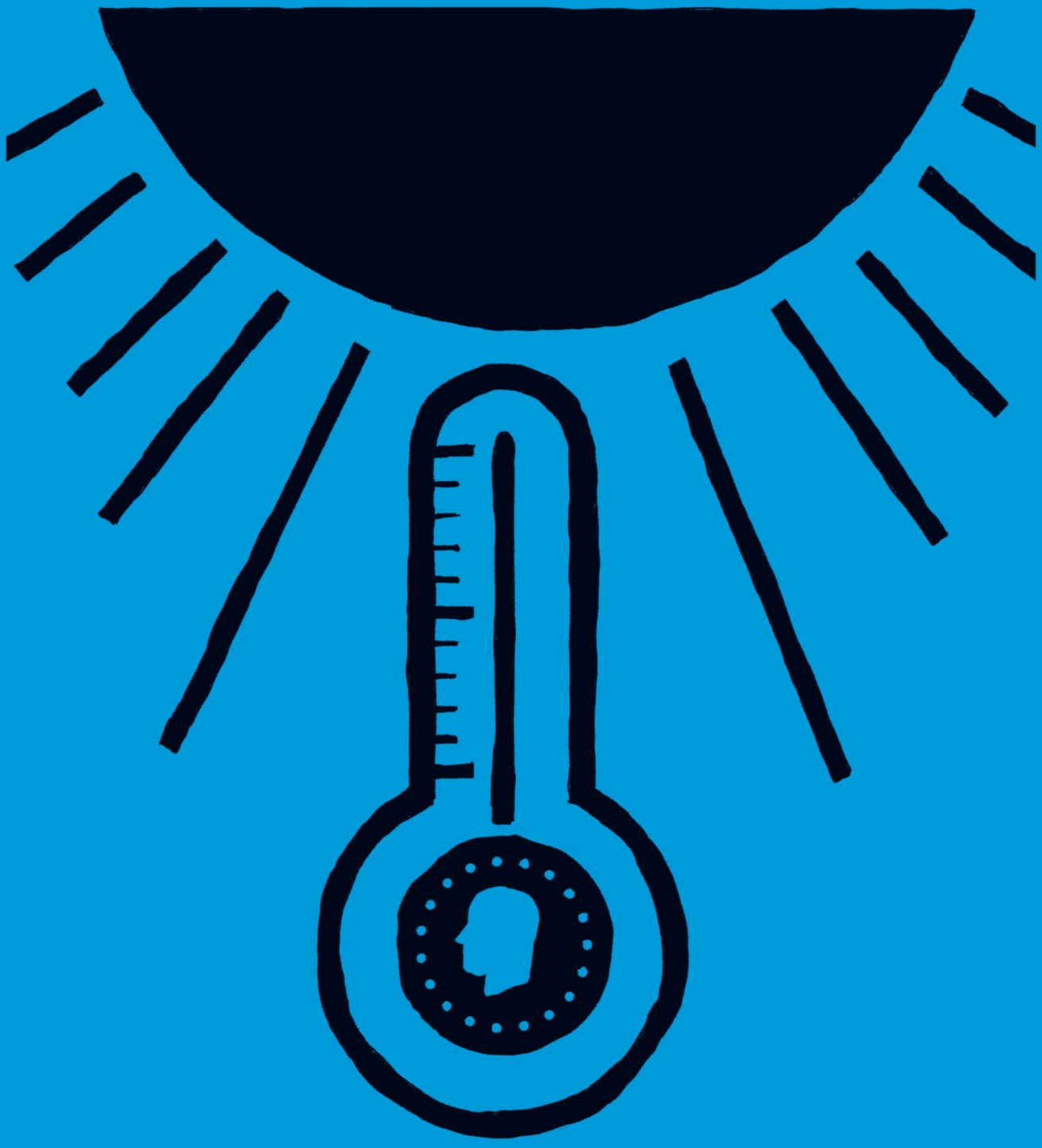
La idea fue propuesta por el matemático estadounidense Edward Lorenz en un artículo de 1963, que también describía la "teoría del caos". Conocido por el llamado "efecto mariposa", su teoría exploraba cómo ocurren los eventos en un sistema caótico como el de la Tierra.

atmósfera. Lorenz sugirió que el batir de una mariposa puede desencadenar una cadena de acontecimientos que eventualmente desencadenan un huracán.

El poder de un enfoque estadístico es inmenso y permitir que la incertidumbre desempeñe un papel ha permitido que el pronóstico del tiempo sea mucho más confiable. Los meteorólogos pueden predecir con confianza el clima local con semanas de anticipación dentro de un rango determinado.

GRAMO DEL SOL

RADIACIÓN TERMAL



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gustav Kirchhoff
(1824-1887)

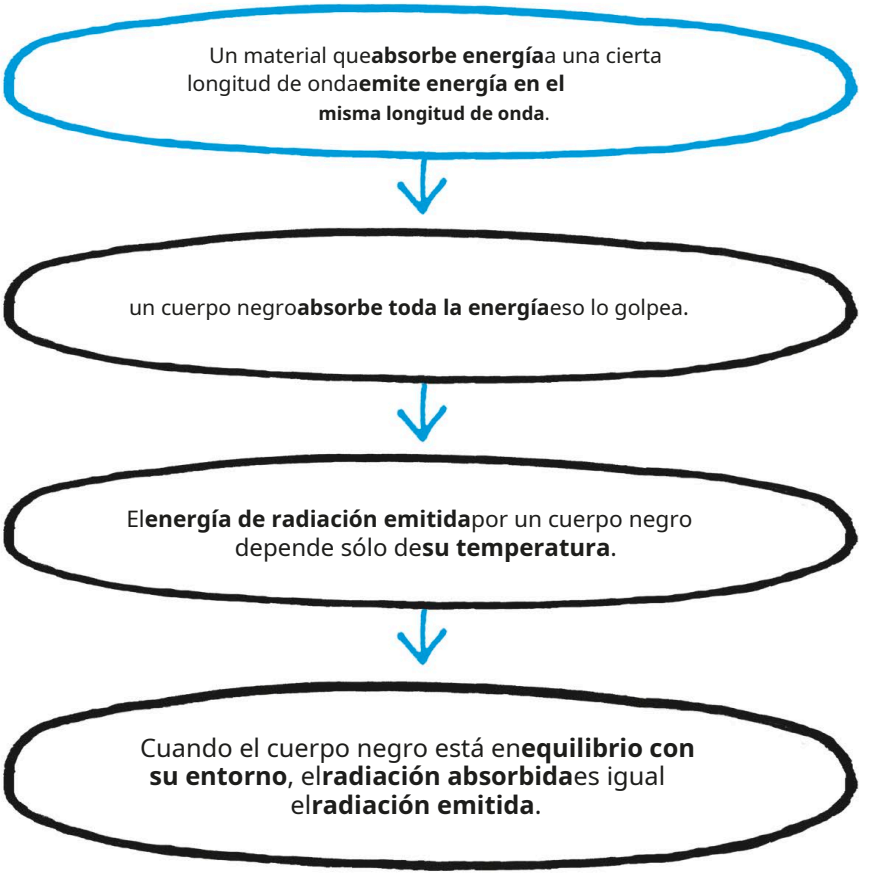
ANTES
1798 Benjamín Thompson (Conde Rumford) sugiere que el calor está relacionado con el movimiento.

1844 James Joule sostiene que el calor es una forma de energía y que otras formas de energía pueden convertirse en calor.

1848 William Thomson (Lord Kelvin) define el cero absoluto.

DESPUÉS
1900 El físico alemán Max Planck propone una nueva teoría para la radiación del cuerpo negro e introduce la idea del cuanto de energía.

1905 Albert Einstein utiliza la idea de Planck sobre la radiación del cuerpo negro para resolver el problema del efecto fotoeléctrico.



La energía se puede transferir de un lugar a otro de tres maneras: por conducción en sólidos, por convección en líquidos y gases, y por radiación. Esta radiación, conocida como térmica o radiación de calor, no requiere contacto físico. Junto con las ondas de radio, la luz visible y los rayos X, la radiación térmica es una forma de radiación electromagnética que viaja en ondas a través del espacio.

James Clerk Maxwell fue el primero en proponer la existencia de ondas electromagnéticas en 1865. Predijo que habría toda una gama, o espectro, de ondas electromagnéticas, y experimentos posteriores demostraron que su teoría era correcta. Todo lo que tiene una temperatura superior al cero absoluto (igual a –459,67 °F o –273,15 °C) emite radiación. Todos los objetos del universo intercambian radiación electromagnética entre sí todo el tiempo. Este flujo constante de energía de un objeto a otro evita que algo se enfríe hasta el cero absoluto, la temperatura mínima teórica a la que un objeto no transmitiría energía alguna.

Calor y luz

El astrónomo británico de origen alemán William Herschel fue uno de los primeros científicos en observar una conexión entre el calor y luz. En 1800, utilizó un prisma para dividir la luz en un espectro y midió la temperatura en diferentes puntos dentro de ese espectro. Notó que la temperatura aumentaba a medida que movía su termómetro de la parte violeta del espectro a la parte roja del espectro.

Para su sorpresa, Herschel descubrió que la temperatura también aumentaba más allá del extremo rojo del espectro, donde no se veía luz alguna. Había descubierto la radiación infrarroja, un tipo de energía invisible al ojo, pero que puede detectarse como calor. Por ejemplo, las tostadoras modernas utilizan radiación infrarroja para transmitir energía térmica al pan.

Ver también: La conservación de la energía 55 · Calor y transferencias 80–81 Energía interna y la primera ley de la termodinámica. 86–89 · Motores térmicos 90–93 Ondas electromagnéticas 192-195 · Cuantos de energía 208–211

intensamente frio El gas y el polvo de la nebulosa del Águila se representan en rojos (–442 F o –263 C) y azules (–388 F o –205 C) mediante el telescopio de infrarrojo lejano del Observatorio Espacial Herschel.

La cantidad de radiación térmica emitida por un objeto depende de su temperatura. Cuanto más caliente está el objeto, más energía emite. Si un objeto está lo suficientemente caliente, una gran parte de la radiación que emite puede verse como luz visible. Por ejemplo, una varilla de metal calentada a una temperatura suficientemente alta comenzará a brillar primero con un color rojo apagado, luego amarillo y luego blanco brillante. Una varilla de metal se ilumina de color rojo cuando llega a un temperatura de más de 1,292 °F (700 °C). Objetos con iguales propiedades radiativas emiten luz del mismo color cuando alcanzan la misma temperatura.

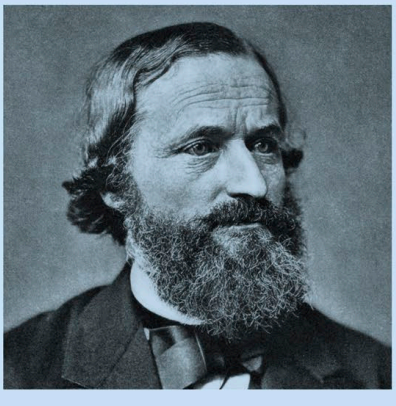
La absorción es igual a la emisión. En 1858, el físico escocés Balfour Stewart presentó un artículo titulado "Un relato de algunos experimentos sobre el calor radiante". Mientras investigaba la absorción y emisión de calor en placas delgadas de diferentes materiales, descubrió que, a todas las temperaturas, las longitudes de onda de la radiación absorbida y emitida son iguales.

Un material que tiende a absorber energía en una determinada longitud de onda tiende también a emitir energía en esa misma longitud de onda. Stewart señaló que "la absorción de una placa es igual a su radiación [emisión], y eso para cada descripción [longitud de onda] de calor".

> Se pueden imaginar cuerpos que... absorban completamente todos los rayos incidentes, y ninguno reflejar ni transmitir ninguno. Llamaré a esos organismos... cuerpos negros.
>
> **Gustav Kirchhoff**

Dos años después de la publicación del artículo de Stewart, el físico alemán Gustav Kirchhoff, ignorante del trabajo del escocés, publicó conclusiones similares. En ese momento, la comunidad académica consideró que el trabajo de Kirchhoff era más riguroso que el de Stewart. investigaciones y encontró aplicaciones más inmediatas en otros campos, como la astronomía. A pesar de que su descubrimiento fue el anterior-

Gustav Kirchhoff



Nacido en 1824, Kirchhoff se educó en Königsberg, Prusia (actual Kaliningrado, Rusia). Demostró su habilidad matemática en 1845 como estudiante, al extender la ley de corriente eléctrica de Ohm a una fórmula que permitía el cálculo de corrientes, voltajes y resistencias en circuitos eléctricos. En 1857, descubrió que la velocidad de la electricidad en un cable altamente conductor era casi exactamente igual a la velocidad de la luz, pero descartó esto como una coincidencia, en lugar de inferir que la luz era un fenómeno electromagnético. En 1860 mostró que cada elemento químico tiene un espectro característico único. Luego trabajó con Robert Bunsen en 1861 para identificar los elementos de la atmósfera del sol examinando su espectro.

Aunque la mala salud en su vida posterior impidió a Kirchhoff trabajar en el laboratorio, continuó enseñando. Murió en Berlín en 1887.

Obra clave

1876 *Vorlesungen über física matemática* (*Conferencias sobre física matemática.*)

> Como podemos producir todo tipo de luz mediante cuerpos calientes, podemos atribuir, a la radiación en equilibrio térmico con cuerpos calientes, la temperatura de estos cuerpos.
> **Guillermo Viena**

De los dos, la contribución de Stewart a la teoría de la radiación térmica fue en gran medida olvidada.

Radiación de cuerpo negro

Los hallazgos de Kirchhoff se pueden explicar de la siguiente manera. Imaginemos un objeto que absorbe perfectamente toda la radiación electromagnética que incide sobre él. Como no refleja radiación, toda la energía que emite depende únicamente de su temperatura y no de su composición química o forma física. En 1862, Kirchhoff acuñó el término "cuerpos negros" para describir estos objetos hipotéticos. Los cuerpos negros perfectos no existen en la naturaleza.

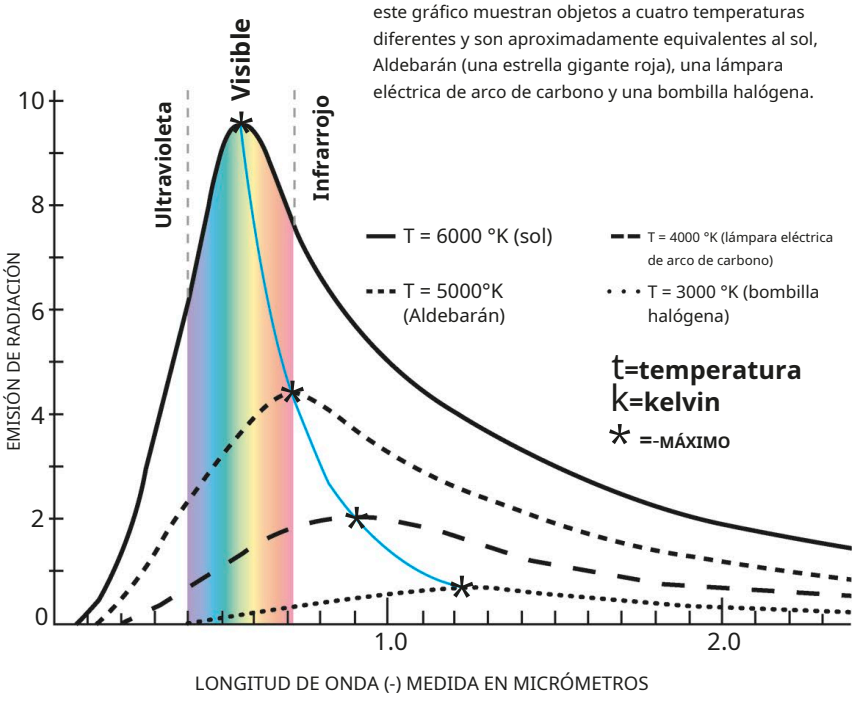
Un cuerpo negro ideal absorbe y emite energía con un 100 por ciento de eficiencia. La mayor parte de su producción de energía se concentra alrededor de una frecuencia máxima, denominada $-_{máximo}$, dónde -es la longitud de onda de la radiación emitida, que aumenta a medida que aumenta la temperatura. Cuando se representa en un gráfico, la dispersión de las longitudes de onda que emiten energía alrededor de la frecuencia máxima del objeto adopta un perfil distintivo conocido como "curva de cuerpo negro". La curva del cuerpo negro del sol, por Por ejemplo, tiene su pico en el centro del rango de luz visible. Dado que los cuerpos negros perfectos no existen, para ayudar a explicar su teoría, Kirchhoff conjeturó un recipiente hueco con un único y pequeño agujero. La radiación sólo puede entrar al recipiente a través del orificio y luego es absorbida dentro de la cavidad, por lo que el orificio actúa como un absorbente perfecto. Se emitirá algo de radiación a través del orificio y a través de la superficie de la cavidad. Kirchhoff demostró que la radiación dentro de la cavidad depende únicamente de la temperatura del objeto y no de su forma, tamaño o material del que está hecho.

Ley de radiación térmica.

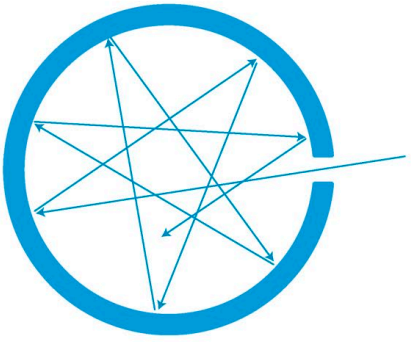
La ley de radiación térmica de Kirchhoff de 1860 establece que cuando un objeto está en equilibrio termodinámico a la misma temperatura que los objetos que lo rodean, la cantidad de La radiación absorbida por la superficie es igual a la cantidad emitida, a cualquier temperatura y longitud de onda. Por tanto, la eficiencia con la que un objeto absorbe radiación en una longitud de onda determinada es la misma que la eficiencia con la que emite energía en esa longitud de onda. Esto se puede expresar de manera más concisa como: absortividad es igual a emisividad.

En 1893, el físico alemán Wilhelm Wien descubrió la relación matemática entre el cambio de temperatura y la forma de la curva del cuerpo negro. Descubrió que cuando se multiplicaba la longitud de onda a la que se emitía la máxima cantidad de radiación por la temperatura del cuerpo negro, el valor resultante era siempre constante.

Este hallazgo significó que la longitud de onda máxima podría calcularse para cualquier temperatura,



Curvas de cuerpo negro Representan la radiación emitida por objetos en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Las curvas aproximadas de este gráfico muestran objetos a cuatro temperaturas diferentes y son aproximadamente equivalentes al sol, Aldebarán (una estrella gigante roja), una lámpara eléctrica de arco de carbono y una bombilla halógena.



Kirchhoff previóun cuerpo negro como recipiente con un pequeño agujero. La mayor parte de la radiación que ingresa al recinto quedará atrapada. La cantidad de radiación emitida depende del entorno.

y explicó por qué los objetos cambian de color a medida que se calientan. A medida que aumenta la temperatura, la longitud de onda máxima disminuye, pasando de ondas infrarrojas más largas a ondas ultravioleta más cortas. Sin embargo, en 1899, cuidadosos experimentos demostraron que las predicciones de Wien no eran precisas para las longitudes de onda en el rango infrarrojo.

Catástrofe ultravioleta

En 1900, los físicos británicos Lord Rayleigh y Sir James Jeans publicaron una fórmula que parecía explicar lo que se había observado en el extremo infrarrojo del espectro. Sin embargo, sus hallazgos pronto fueron cuestionados. Según su teoría, efectivamente no había límite superior para el nivel superior.
frecuencias de energía ultravioleta que serían generadas por la radiación del cuerpo negro, lo que significa que un número infinito de ondas altamente energéticas serían
producido. Si este fuera el caso, abrir la puerta del horno para comprobar cómo está un pastel mientras se hornea resultaría en una aniquilación instantánea en un estallido de intensa radiación. Esto llegó a ser conocido como la "catástrofe ultravioleta" y obviamente fue incorrecto. Pero explicar por qué los cálculos de Rayleigh-Jeans eran incorrectos requería una física teórica audaz, como nunca se había intentado.

Comienzos cuánticos

Al mismo tiempo que se anunciaban los hallazgos de Rayleigh-Jeans, Max Planck estaba trabajando en su propia teoría sobre la radiación del cuerpo negro en Berlín. En octubre de 1900 propuso una explicación para la curva del cuerpo negro que coincidía con todas las mediciones experimentales conocidas, pero que iba más allá del marco de la física clásica. Su solución fue radical e implicó una forma completamente nueva de ver el mundo.

Planck descubrió que la catástrofe ultravioleta podría evitarse entendiendo que la emisión de energía de un cuerpo negro no se produce en ondas continuas, sino en paquetes discretos, a los que llamó "cuantos". El 19 de diciembre de 1900, Planck presentó sus hallazgos en una reunión de la Sociedad Alemana de Física en Berlín. Generalmente se acepta que esta fecha marca el nacimiento de la mecánica cuántica y una nueva era en la física.-

> Estas leyes de la luz... pueden haber sido observadas antes, pero creo que ahora están conectados por primera vez con una teoría de radiación.
>
> **Gustav Kirchhoff**

Temperaturas estelares

Es posible calcular la temperatura de la superficie de un cuerpo negro midiendo la energía que emite en longitudes de onda específicas. Dado que las estrellas, incluido el Sol, producen espectros de luz que se aproximan mucho al espectro de un cuerpo negro, es posible calcular la temperatura de una estrella distante.

La temperatura de un cuerpo negro viene dada por la siguiente fórmula:t=2898/ - dónde$t$=la temperatura del cuerpo negro (medida en grados Kelvin), y - la longitud = de onda (-, medida en micrómetros) del Emisión máxima del cuerpo negro.
máximo
máximo

Esta fórmula se puede utilizar para calcular la temperatura de la fotosfera de una estrella (la superficie emisora de luz) utilizando la longitud de onda a la que emite la máxima cantidad de luz. Las estrellas frías emiten más luz del extremo rojo y naranja del espectro, mientras que las estrellas más calientes aparecen en azul. Por ejemplo, las supergigantes azules, como se muestra en la impresión artística anterior, son una clase de estrella que puede ser hasta ocho veces más caliente que el sol.

ELECTRICIDAD

MAGNETIS

dos fuerzas se unen

TY Y

METRO

Los antiguos griegos dar**ámbar**un**eléctrico** **cargar**frotándolo con piel de conejo, usando su atracción para moverse objetos ligeros.

médico y físico inglés William Gilbert publica*De Magnete*(*En el imán*), el primer trabajo sistemático sobre**electricidad**y **magnetismo**desde la antigüedad. Acuña la nueva palabra latina*electrica*, del griego para ámbar (*electrón*).

Benjamin Franklin desarrolla su**un fluido** **teoría**de electricidad, en que presenta la idea de**carga positiva y negativa**.

Alejandro Volta demuestra el primera pila eléctrica, o **batería**, cual proporciona continuo **corriente eléctrica**para la primera vez.

SIGLO VIantes de Cristo

1600

1747

1800

SIGLO IIantes de Cristo

Los eruditos chinos utilizan fragmentos de**magnético** **piedra imán**tan simple buscadores de dirección.

1745

Clérigo alemán Ewald Georg von Kleist y científico holandés Pieter van Musschenbroek inventó el **tarro de leyden**como una manera de**almacenar carga eléctrica**.

1785

Carlos Agustín de Coulomb descubre su ley para determinar la**fuerza atractiva o repulsiva**entre dos objetos cargados eléctricamente.

En la antigua Grecia, los estudiosos notaron que algunas piedras de Magnesia, en la actual Tesalia, se comportaban de manera extraña cuando se colocaban cerca de ciertos metales y piedras ricas en hierro. Las piedras atrajeron los metales hacia ellos mediante una atracción invisible. Cuando se colocaron de una manera particular, se vio que dos de estas piedras se atraían entre sí, pero se separaban cuando se giraba una.

Los eruditos griegos antiguos también notaron un comportamiento similar, pero sutilmente diferente, cuando se frotaba ámbar (savia de árbol fosilizada) con piel de animal. Después de frotarlo durante un rato, el ámbar adquiriría una extraña habilidad para hacer bailar objetos ligeros, como plumas, pimienta molida o cabello. El matemático Tales de Mileto argumentó que lo invisible La fuerza que producía estos fenómenos era evidencia de que las piedras y el ámbar tenían alma.

Las extrañas fuerzas que exhiben las piedras de Magnesia se conocen hoy como magnetismo, tomando su nombre de la región donde se encontró por primera vez. Las fuerzas exhibidas por el ámbar recibieron el nombre de electricidad, de la antigua palabra griega para ámbar,*electrón* . Los eruditos chinos y, más tarde, los marineros y otros viajeros utilizaron pequeños fragmentos de piedra de magnesia colocados en el agua como una versión temprana de la brújula, ya que las piedras se alineaban de norte a sur.

Atracción y repulsión No se encontró ningún nuevo uso para la electricidad hasta el siglo XVIII. En ese momento, se había descubierto que frotar otros materiales juntos produjeron un comportamiento similar al del ámbar y la piel. Por ejemplo, el vidrio frotado con seda también hacía bailar a los objetos pequeños. Cuando se frotaban tanto el ámbar como el vidrio, se juntaban en una atracción, mientras que dos trozos de ámbar o dos de vidrio se separaban. Estas fueron identificadas como dos electricidades distintas: la electricidad vítrea para el vidrio y la electricidad vítrea para el vidrio.

resinoso para el ámbar.

El erudito estadounidense Benjamín Franklin optó por identificar estos dos tipos de electricidad con números positivos o negativos, con una magnitud que llegó a conocerse como carga eléctrica. Mientras se escondía de los revolucionarios para mantener la cabeza pegada al cuerpo, el físico e ingeniero francés Charles-Augustin de Coulomb llevó a cabo una serie de experimentos.

1820 — El físico danés Hans. Christian Ørsted descubre que un cable que transporta una electricidad La corriente produce un **campo magnético**.

1825 — El físico francés André-Marie. Ampère proporciona una derivación matemática de la **fuerza magnética**entre dos alambres paralelos que llevan un corriente eléctrica.

1827 — El físico alemán Georg. Ohm publica su**ley** estableciendo el relación entre **actual**,**Voltaje**, y**resistencia**.

1831 — Michael Faraday genera un **corriente eléctrica** de un cambio campo magnético para descubrir**inducción**.

1865 — James Clerk Maxwell combina todo conocimiento de Electricidad y magnetismo en algunas**ecuaciones**.

1882 — inventor americano Thomas Edison primero**electricidad** **planta generadora** comienza a producir en Londres.

1911 — físico holandés Heike Kamerlingh Onnes descubre **superconductividad**en mercurio enfriado a cerca del cero absoluto.

1999 — químico americano Chad Mirkin inventa **nanolitografia**, que "escribe" nanocircuitos en **obleas de silicio**.

Descubrió que la fuerza de atracción o repulsión entre objetos eléctricos se debilitaba a medida que aumentaba la distancia entre ellos.

También se observó que fluía electricidad. Pequeñas chispas saltarían de un objeto cargado eléctricamente a uno sin carga en un intento de equilibrar o neutralizar la carga. Si un objeto tenía una carga diferente a la de los que lo rodeaban, entonces se decía que ese objeto tenía un potencial diferente. Cualquier diferencia de potencial puede inducir un flujo de electricidad llamado corriente. Se descubrió que las corrientes eléctricas fluían fácilmente a través de la mayoría de los metales, mientras que los materiales orgánicos parecían mucho menos capaces de permitir el flujo de una corriente.

En 1800, el físico italiano Alessandro Volta observó que las diferencias en la reactividad química de los metales podían provocar a una diferencia de potencial eléctrico. Ahora sabemos que las reacciones químicas y el flujo de electricidad a través de un metal están indisolublemente ligados porque ambos resultan del movimiento de electrones subatómicos.

Una fuerza combinada

A mediados del siglo XIX, en Gran Bretaña, Michael Faraday y James Clerk Maxwell establecieron el vínculo entre dos fuerzas aparentemente distintas, la electricidad y el magnetismo, dando lugar a la fuerza combinada de electromagnetismo. Faraday creó la idea de campos, líneas de influencia que se extienden desde una carga eléctrica o un imán, mostrando la región donde se sienten las fuerzas eléctricas y magnéticas. También demostró que los campos magnéticos en movimiento pueden inducir una corriente eléctrica y que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos.

Maxwell acomodó elegantemente los hallazgos de Faraday y los de científicos anteriores en sólo cuatro ecuaciones. Al hacerlo, él Descubrió que la luz era una perturbación de los campos eléctricos y magnéticos. Faraday realizó experimentos que demostraron esto, mostrando que los campos magnéticos afectan el comportamiento de la luz.

La comprensión que tienen los físicos del electromagnetismo ha revolucionado el mundo moderno a través de tecnologías que se han desarrollado para utilizar la electricidad y el magnetismo de formas nuevas e innovadoras. La investigación sobre el electromagnetismo también abrió áreas de estudio previamente impensadas, atacando el corazón de la ciencia fundamental: guiándonos profundamente hacia el interior del átomo y hacia el cosmos.-

MARAVILLOSO EFECTIVO

MAGNETISMO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Guillermo Gilberto(1544-1603)

ANTES

siglo sextoantes de CristoTales de Mileto afirma que el hierro se siente atraído por el "alma" de la piedra imán.

1086 El astrónomo Shen Kuo (Meng Xi Weng) describe una brújula de aguja magnética.

1269 El erudito francés Petrus Peregrinus describe los polos magnéticos y las leyes de atracción y repulsión.

DESPUÉS

1820 Hans Christian Ørsted descubre que una corriente eléctrica que fluye por un cable desvía una aguja magnética.

1831 Michael Faraday Describe "líneas de fuerza" invisibles alrededor de un imán.

1906 El físico francés Pierre-Ernest Weiss propone la teoría de los dominios magnéticos para explicar el ferromagnetismo.

Las sorprendentes propiedades de la rara imán natural, un mineral de hierro llamado magnetita, fascinaron a las culturas antiguas de Grecia y China. Los primeros escritos de estas civilizaciones describen cómo la piedra imán atrae el hierro y lo afecta a distancia sin ningún mecanismo visible.

En el siglo XI, los chinos habían descubierto que una piedra imán se orientaría de norte a sur si se le permitía moverse libremente (por ejemplo, cuando se colocaba en un recipiente que flotaba en un recipiente con agua). Además, una aguja de hierro frotada con un imán heredaría sus propiedades y podría usarse para hacer una brújula. La brújula marítima hizo posible que los barcos se alejaran de la costa y el instrumento llegó a Europa a través de los marinos chinos. En el siglo XVI, la brújula impulsaba la expansión de los imperios europeos, además de utilizarse en agrimensura y minería.

A pesar de siglos de aplicación práctica, el mecanismo físico subyacente del magnetismo no se conocía bien. La primera

La explicación sistemática sobre el magnetismo fue la de Petrus Peregrinus del siglo XIII.

la aguja de una brújula**apunta aproximadamente al norte**, pero también muestra**declinación**(desviación del norte verdadero) y **inclinación**(inclinando hacia o alejándose de la superficie de la Tierra).

La aguja de una brújula muestra**exactamente el mismo comportamiento** cuando se mueve sobre la superficie de un **roca magnética esférica**, o imán.

La Tierra es un imán gigante.

Ver también: Hacer imanes 134–135 · El efecto motor 136-137 Inducción y el efecto generador 138-141 Monopolos magnéticos 159

> Los postes de las barras de hierro cambian cuando un imán simplemente les presenta su poste y los enfrenta incluso desde cierta distancia.
> **Guillermo Gilberto**

texto en el que describía la polaridad (la existencia de los polos norte y sur magnéticos en pares). También descubrió que las piezas de imán "heredaban" propiedades magnéticas.

Las pequeñas Tierras de Gilbert

Fue el trabajo innovador del astrónomo inglés William Gilbert el que disipó supersticiones arraigadas sobre el magnetismo. La innovación clave de Gilbert fue simular la naturaleza en el laboratorio.

Usando esferas de imán que llamó *terella* (Tierras pequeñas en latín), demostró que la aguja de una brújula se desviaba de la misma manera sobre diferentes partes de la esfera que sobre la superficie.
regiones correspondientes de nuestro planeta. Llegó a la conclusión de que la Tierra era en sí misma un imán gigante y publicó sus hallazgos en el innovador *De Magnete* (*En el imán*) en 1600.

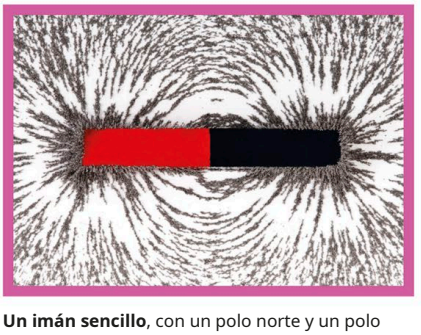
Una nueva comprensión

El magnetismo exhibido por la magnetita se llama ferromagnetismo, propiedad que también se observa con el hierro, el cobalto, el níquel y sus aleaciones. Cuando se acerca un imán a un objeto hecho de material ferromagnético, el objeto mismo se vuelve magnético. El polo que se aproxima del imán induce un polo opuesto en el lado cercano del imán. objeto ferromagnético y lo atrae. Dependiendo de su composición exacta e interacción con el imán, el objeto ferromagnético puede magnetizarse permanentemente, conservando esta propiedad después de retirar el imán original.

Una vez que los físicos conectaron la electricidad y el magnetismo y desarrollaron una comprensión de la estructura atómica en el siglo XIX, comenzó a surgir una teoría razonable del ferromagnetismo.

La idea es que el movimiento de los electrones en un átomo convierte a cada átomo en un dipolo magnético en miniatura (con polos norte y sur). En materiales ferromagnéticos como el hierro, grupos de átomos vecinos se alinean para formar regiones llamadas dominios magnéticos.

Estos dominios suelen estar dispuestos en bucles cerrados, pero cuando se magnetiza una pieza de hierro, los dominios se alinean a lo largo de un solo eje, creando polos norte y sur en los extremos opuestos de la pieza.



Un imán sencillo, con un polo norte y un polo sur, crea líneas de fuerza a su alrededor. Las limaduras de hierro esparcidas alrededor del imán se alinean a lo largo de estas líneas de fuerza, que son más fuertes en cada polo.

Guillermo Gilberto

William Gilbert nació en una próspera familia inglesa en 1544. Después de graduarse en Cambridge, se estableció como un destacado médico en Londres. Se reunió con destacados oficiales navales, entre ellos Francis Drake, y cultivó conexiones en la corte de Isabel I. A través de sus conexiones y en visitas a los muelles, Gilbert aprendió sobre el comportamiento de las brújulas en el mar y adquirió especímenes de imanes. Su trabajo con estas rocas magnéticas influyó en su obra maestra..

En 1600, Gilbert fue elegido presidente de la Real Sociedad de Médicos y nombrado médico personal de Isabel I. También
Inventó el electroscopio para detectar cargas eléctricas y distinguió la fuerza de la electricidad estática de la del magnetismo. Murió en 1603, posiblemente sucumbiendo a peste bubónica.

Trabajos clave

1600 *De Magnete* (*En el imán*)
1651 *De Mundo nostro Sublunari Philosophia Nova* (*La nueva filosofía*)

LA ATRACCIÓN DE ELECTRICIDAD

CARGA ELÉCTRICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Carlos-Agustín de Culombio(1736-1806)

ANTES
siglo sextoantes de CristoTales de Mileto observa los efectos electrostáticos causados por la fricción en*electrón*(Griego para ámbar).

1747 Benjamin Franklin Identifica carga positiva y negativa.

DESPUÉS
1832 Michael Faraday muestra que los efectos eléctricos estáticos y actuales son manifestaciones de un solo fenómeno.

1891 George J. Stoney dice que la carga ocurre en unidades discretas.

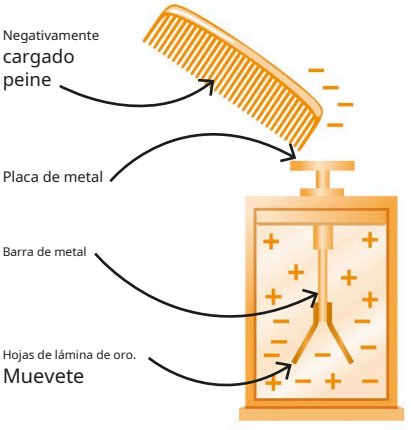
1897JJ Thomson descubre que los rayos catódicos son corrientes de partículas subatómicas cargadas.

1909 Robert Millikan estudia la carga de un electrón.

Durante milenios, la gente ha observado efectos eléctricos en la naturaleza, por ejemplo, los rayos, las descargas eléctricas (peces torpedos) y las fuerzas de atracción cuando ciertos materiales se tocan o se frotan entre sí.

Sin embargo, sólo en los últimos cientos de años hemos comenzado a entender estos efectos como manifestaciones del mismo fenómeno subyacente: la electricidad. Más precisamente, se trata de efectos electrostáticos, debidos a fuerzas eléctricas que surgen de cargas eléctricas estáticas (estacionarias). Los efectos de la corriente eléctrica, por otro lado, son causados por cargas en movimiento.

Ver también: Leyes de gravedad 46–51 · Potencial eléctrico 128–129 · Corriente eléctrica y resistencia 130–133 · Bioelectricidad 156 · Partículas subatómicas 242–243



El electroscopio de pan de oro Detecta la electricidad estática mediante el principio de repulsión de cargas similares. Cuando se acerca un peine cargado negativamente a la placa de metal, los electrones (que llevan carga negativa) son repelidos hacia las hojas de lámina dorada del electroscopio, lo que hace que las hojas se separen.

El concepto de carga eléctrica y una descripción matemática de las fuerzas entre cargas surgieron en el siglo XVIII. Anteriormente, los antiguos griegos habían notado que cuando un trozo de ámbar (*electrón*), si se frotaba con lana, atraería objetos ligeros como plumas.

En su libro de 1600 *De Magnete* (*En el imán*), William Gilbert denominó a este efecto "electricus" y analizó sus experimentos con el instrumento que había ideado para detectar la fuerza: el versorium. Gilbert vio que la fuerza tenía un efecto instantáneo a lo largo de la distancia y sugirió que debía ser transportada por un "fluido" eléctrico de rápido movimiento liberado por el ámbar frotado, en lugar de un "efluvio" que se difundía lentamente, como se pensaba anteriormente.

En 1733, el químico francés Charles François du Fay observó que las fuerzas eléctricas podían ser repulsivas. además de atractivo, y postuló que había dos tipos de fluido eléctrico: vítreo y resinoso. Los fluidos iguales (como dos fluidos vítreos) se repelían y los fluidos diferentes se atraían.

Esta teoría fue simplificada por el estadista y erudito estadounidense Benjamín Franklin en 1747, cuando propuso que sólo existía un tipo de fluido eléctrico y diferentes objetos podían tener un excedente o una deficiencia de este fluido. Calificó el excedente de fluido (carga, en términos actuales) como positivo y el déficit como negativo, y propuso que la cantidad total de fluido en el universo se conservaba (constante). También diseñó (y posiblemente realizó) un experimento para demostrar que un rayo era un flujo de fluido eléctrico, al volar una cometa en una tormenta. La carga todavía se etiqueta como positiva o negativa, aunque esto es simplemente una convención: no hay exceso de "fluido" en un protón que lo haga positivo, y nada falta en un electrón que lo haga negativo.

ley de Coulomb

Durante el siglo XVIII, los científicos sugirieron leyes matemáticas que podrían gobernar la fuerza de la-

> Los cuerpos, electrificados con el mismo tipo de electricidad, son repelidos mutuamente.
>
> **Carlos-Agustín de Culombio**

Electrostático descargar

Una descarga electrostática ocurre cuando los portadores de carga eléctrica (generalmente electrones) en un cuerpo o región cargados son conducidos rápida y violentamente lejos de él. Los rayos son una forma particularmente poderosa de descarga electrostática que ocurre cuando se ha acumulado tanta carga entre regiones del

atmósfera que el
el espacio intermedio se ioniza (los electrones se separan de sus átomos) y pueden conducir una corriente.

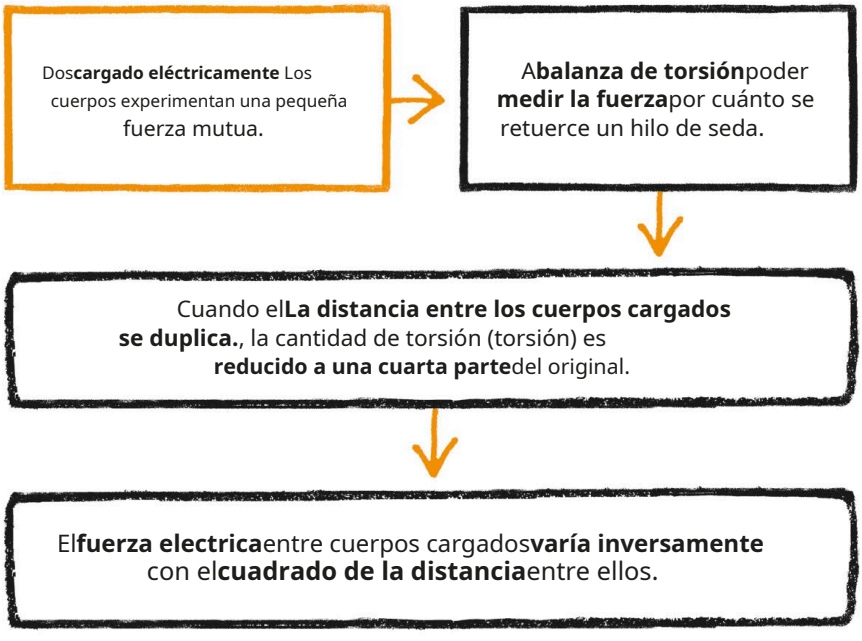
La corriente se hace visible cuando los electrones se calientan. el aire tanto que emite luz. La ionización se produce en distancias cortas, razón por la cual los relámpagos aparecen bifurcados y cambian de dirección cada pocos metros. Electrostático
La descarga ocurre primero en los bordes afilados, razón por la cual se te ponen los pelos de punta cuando se carga estáticamente (las puntas del cabello se repelen entre sí) y por qué los pararrayos y los dispositivos de descarga estática en las alas de los aviones tienen forma de púas.

fuerza eléctrica, modelada según la ley de gravitación del cuadrado inverso que Newton había establecido en su enormemente influyente *Principios* de 1687.

En 1785, el ingeniero francés Charles-Augustin de Coulomb desarrolló una balanza de torsión que era lo suficientemente sensible como para medir la fuerza eléctrica entre cargas. El aparato constaba de una serie de esferas metálicas conectadas por una varilla, una aguja e hilo de seda. Cuando Coulomb sostuvo un objeto cargado junto a la esfera externa, la carga se transfirió a una esfera interna y a una aguja. La aguja, suspendida de un hilo de seda, se alejó de la esfera cargada y produjo una torsión en el hilo de seda. El grado de torsión se podía medir en una escala.

Coulomb publicó una serie de artículos que detallaban sus experimentos y establecían que la fuerza entre dos cuerpos cargados estacionarios era inversamente proporcional a la distancia entre ellos. También supuso, pero no demostró, que la fuerza era proporcional al producto de las cargas sobre los cuerpos. Hoy, esta ley se llama ley de Coulomb.

> Las ciencias son monumentos. dedicado al bien público; cada ciudadano les debe un tributo proporcional a sus talentos.
>
> **Carlos-Agustín de Culombio**



Coulomb estableció que cuando las cargas eléctricas se atraen o se repelen, existe una relación entre la fuerza de atracción o repulsión y la distancia. Sin embargo, pasaría más de un siglo antes de que los científicos se acercaran a comprender la naturaleza exacta de la carga eléctrica.

Encontrar el portador de carga

En la década de 1830, el científico británico Michael Faraday llevó a cabo experimentos con electrólisis (usando electricidad para impulsar reacciones químicas) y descubrió que necesitaba una cantidad específica de electricidad para crear una cantidad específica de un compuesto o elemento. Aunque no estaba convencido de que la materia estuviera compuesta de átomos (partes indivisibles), este resultado sugería que la electricidad, al menos, podría venir en "paquetes". En 1874, el físico irlandés George Stoney desarrolló la idea de que existía un paquete o unidad de carga eléctrica indivisible, es decir, carga fue cuantificado, y en 1891 sugirió un nombre para esta unidad: el electrón.

En 1897, el físico británico JJ Thomson demostró que los rayos catódicos (los "rayos" brillantes de electricidad que podían viajar entre dos placas cargadas en un tubo de vidrio sellado que contenía muy poco gas (casi el vacío)) estaban hechos de partículas cargadas eléctricamente. Aplicando fuerzas eléctricas y magnéticas de fuerza conocida a los rayos catódicos, Thomson pudo doblarlos en una cantidad mensurable. Luego podría calcular cuánta carga debe llevar una partícula por unidad de masa.

Thomson también dedujo que estos portadores de carga eran mucho más ligeros que el átomo más pequeño. Eran comunes en toda la materia porque el comportamiento de los rayos no variaba aunque se utilizaran placas de distintos metales. Esta partícula subatómica, la primera en ser descubierta, recibió entonces el nombre de Stoney para el proceso básico.

unidad de carga: el electrón. La carga de un electrón se asignó como negativa. Unos años más tarde se descubriría el portador de carga positiva, el protón.

La carga de un electrón

Aunque Thomson había calculado la relación carga-masa del electrón, no se conocían ni la carga ni la masa. De 1909 a 1913, el físico estadounidense Robert Millikan realizó una serie de experimentos para encontrar estos valores. Usando un aparato especial, él midió el campo eléctrico necesario para mantener una gota cargada de aceite suspendida en el aire. A partir del radio de una gota, podía calcular su peso. Cuando la gota estaba quieta, la fuerza eléctrica ascendente sobre ella equilibraba la descendente. fuerza gravitacional y se podría calcular la carga de la gota.

Al repetir el experimento muchas veces, Millikan descubrió que todas las gotas llevaban cargas que eran múltiplos de números enteros de un número más pequeño en particular. Millikan razonó que este número más pequeño debe ser la carga de un solo electrón, llamada carga elemental, e, que calculó como ser -1,6 - 10^{-19}C (culombios), muy cercano al valor aceptado actualmente. Casi un siglo después de que Franklin sugiriera que la cantidad total de "fluido" eléctrico es constante, Faraday realizó experimentos que sugirieron que la carga se conserva: la cantidad total de carga en el universo sigue siendo la misma.

Saldo de carga

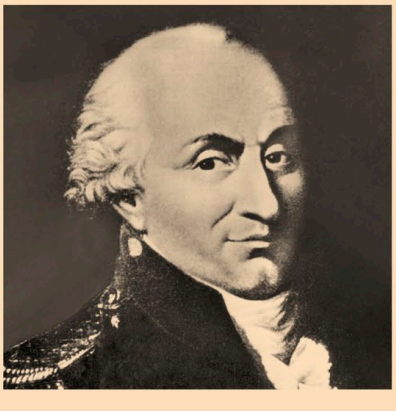
Este principio de conservación de la carga es fundamental en la física moderna, aunque hay circunstancias: en las colisiones de alta energía entre partículas en aceleradores de partículas, por ejemplo, donde la carga se crea a través de una partícula neutra que se divide en partículas negativas y positivas. Sin embargo, en este caso, la carga neta es constante: se crea un número igual de partículas positivas y negativas que llevan cantidades iguales de carga negativa y positiva.

Este equilibrio entre cargas no es sorprendente dada la intensidad de la fuerza eléctrica. El cuerpo humano no tiene carga neta y contiene cantidades iguales de carga positiva y negativa, sino un hipotético desequilibrio de sólo el uno por ciento le haría sentir fuerzas de poder devastador. Nuestra comprensión de la carga eléctrica y los portadores no ha cambiado drásticamente desde el descubrimiento del electrón y el protón. También conocemos otros portadores de carga, como el positrón con carga positiva y el positrón con carga negativa. antiprotones que forman una forma exótica de materia llamada antimateria.

En terminología moderna, la carga eléctrica es una propiedad fundamental de la materia que ocurre en todas partes: en los rayos, dentro de los cuerpos de los rayos eléctricos, en las estrellas y dentro de nosotros. Las cargas estáticas crean campos eléctricos a su alrededor, regiones en las que otras cargas eléctricas "sienten" una fuerza. Las cargas en movimiento crean campos eléctricos y magnéticos y, a través de la interacción sutil entre estos campos, dan lugar a radiación electromagnética o luz.

Desde el desarrollo de la mecánica cuántica y la física de partículas en el siglo XX, ahora entendemos que muchas de las propiedades más familiares de la materia están fundamentalmente relacionadas con el electromagnetismo. De hecho, la fuerza electromagnética es una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza.

Carlos-Agustín de Culombio

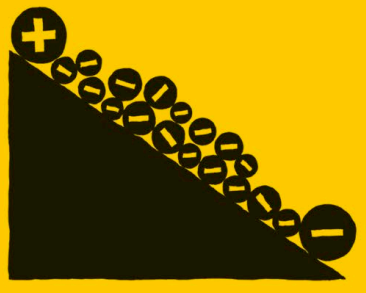


Nacido en 1736 en una familia francesa relativamente rica, Coulomb se graduó como ingeniero militar. Pasó nueve años en la colonia francesa de Martinica en las Indias Occidentales, pero sufrió una enfermedad y regresó a Francia en 1773.

Mientras construía un fuerte de madera en Rochefort, suroeste de Francia, llevó a cabo un trabajo pionero sobre la fricción y ganó el Gran Premio de la Academia de Ciencias en 1781. Luego se mudó a París y dedicó la mayor parte de su tiempo a la investigación. Además de desarrollar el equilibrio de torsión, Coulomb escribió memorias en las que formuló la ley del cuadrado inverso que lleva su nombre. También consultó sobre proyectos de ingeniería civil y supervisó la establecimiento de escuelas secundarias. Murió en París en 1806. La unidad de carga del SI, el culombio, lleva su nombre en su honor.

Trabajos clave

1784 *Investigación teórica y experimentos sobre la fuerza de torsión y la elasticidad de alambres metálicos.* **1785** *Memorias sobre electricidad y magnetismo*



ENERGÍA POTENCIAL SE VUELVE PALPABLE

MOVIMIENTO

POTENCIAL ELÉCTRICO

IN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Alejandro Volta
(1745-1827)

ANTES
1745 Pieter van Musschenbroek y E. Georg von Kleist inventan la jarra de Leyden, el primer dispositivo práctico capaz de almacenar carga eléctrica.

1780 Luigi Galvani observa la "electricidad animal".

DESPUÉS
1813 El matemático y físico francés Siméon-Denis Poisson establece una ecuación general para el potencial.

1828 El matemático británico George Green desarrolla las ideas de Poisson e introduce el término "potencial".

1834 Michael Faraday Explica la base química de la celda voltaica (galvánica).

1836 El químico británico John Daniell inventa la célula de Daniell.

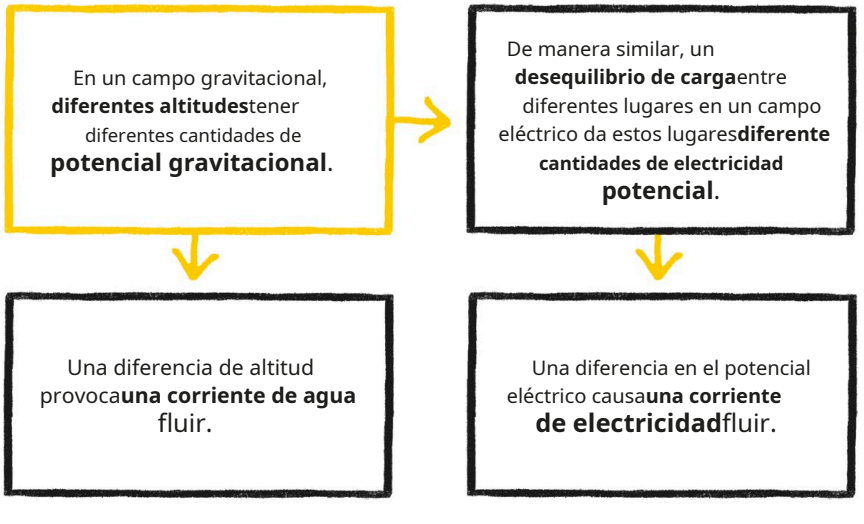
A lo largo de los siglos XVII y XVIII, un número cada vez mayor de investigadores comenzaron a dedicarse al estudio de la electricidad, pero siguió siendo un fenómeno efímero.

La jarra de Leyden, inventada en 1745 por dos químicos holandeses y alemanes que trabajaban de forma independiente, permitía acumular y almacenar carga eléctrica hasta que fuera necesaria. Sin embargo, el frasco se descargaría (descargaría la carga) rápidamente como una chispa. No fue hasta finales del siglo XVIII, cuando el químico italiano Alessandro Volta desarrolló el primer celda electroquímica, que los científicos tenían un suministro de un flujo moderado de carga eléctrica a lo largo del tiempo: una corriente.

Energía y potencial

Tanto la descarga repentina de la jarra de Leyden como la descarga prolongada (corriente) de una batería son causadas por una diferencia en lo que se llama "potencial eléctrico" entre cada dispositivo y su entorno.

Hoy en día se considera que el potencial eléctrico es una propiedad del campo eléctrico que existe alrededor de las cargas eléctricas. El potencial eléctrico en un solo punto es siempre



Ver también: Energía cinética y energía potencial 54 · Carga eléctrica 124–127 · Corriente eléctrica y resistencia 130–133. Bioelectricidad 156

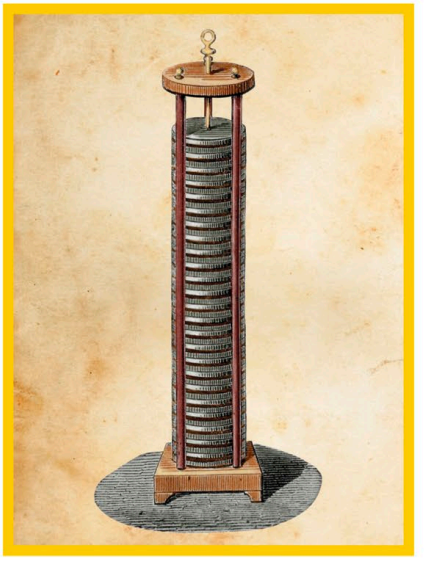
medido en relación con el de otro punto. Un desequilibrio de carga entre dos puntos da lugar a una diferencia de potencial entre ellos. La diferencia de potencial se mide en voltios (V) en honor a Volta y se la denomina informalmente "voltaje". El trabajo de Volta allanó el camino para avances fundamentales en la comprensión de la electricidad.

De la electricidad animal a las baterías

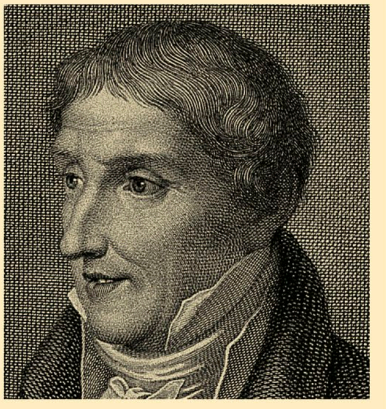
En 1780, el médico italiano Luigi Galvani había notado que cuando tocaba la anca de una rana (muerta) con dos metales diferentes, o le aplicaba una chispa eléctrica, la pata se contraía. Supuso que la fuente de este movimiento era el cuerpo de la rana y dedujo que contenía un fluido eléctrico. Volta realizó experimentos similares, pero sin animales, y finalmente llegó a la teoría de que la disimilitud de los metales en el circuito era la fuente de la electricidad.

La celda electroquímica simple de Volta consta de dos piezas de metal (electrodos), separadas por una solución salina (un electrolito). Cuando cada metal se encuentra con el electrolito, se produce una reacción química que crea "portadores de carga" llamados iones (átomos que han ganado o perdido electrones y, por lo tanto, están cargados negativa o positivamente). En los dos electrodos aparecen iones con cargas opuestas. Debido a que cargas diferentes se atraen entre sí, separar cargas positivas y negativas requiere energía (al igual que sostener aparte los polos opuestos de dos imanes). Esta energía proviene de reacciones químicas en la célula. Cuando la celda está conectada a un circuito externo, la energía que fue "almacenada" en la diferencia de potencial aparece como la energía eléctrica que impulsa la corriente alrededor del circuito.

Volta fabricó su batería conectando celdas individuales hechas de discos de plata y zinc separados por tela empapada en salmuera. En 1800, demostró la pila voltaica resultante ante la Royal Society de Londres. Las pilas voltaicas sólo suministran corriente durante un breve periodo de tiempo antes de que se detengan las reacciones químicas. Desarrollos posteriores, como la pila Daniell y la moderna pila seca de zinc-carbono o alcalina, han mejorado considerablemente la longevidad. Al igual que las pilas alcalinas, las pilas voltaicas no se pueden recargar una vez agotadas y se denominan células primarias. Las celdas secundarias, como las que se encuentran en las baterías de polímero de litio de los teléfonos móviles, se pueden recargar aplicando una diferencia de potencial entre los electrodos para revertir la reacción química.



La pila voltaica Consiste en una serie de discos metálicos separados por un paño empapado en salmuera. Una reacción química entre ellos crea una diferencia de potencial, que impulsa una corriente eléctrica.



Alejandro Volta

Alessandro Volta nació en una familia aristocrática en 1745 en Como, Italia. Volta tenía sólo siete años cuando murió su padre. Sus familiares orientaron su educación hacia la Iglesia, pero él emprendió sus propios estudios en electricidad y comunicó sus ideas a destacados científicos.

Tras las primeras publicaciones de Volta sobre electricidad, fue designado para enseñar en Como en 1774. Al año siguiente, desarrolló el electróforo (un instrumento para generar carga eléctrica), y en 1776 descubrió el metano. volta se convirtió profesor de física en Pavía en 1779. Allí entabló una rivalidad amistosa con Luigi Galvani en Bolonia. Las dudas de Volta sobre las ideas de Galvani sobre la "electricidad animal" llevaron a su invención de la pila voltaica. Honrado por ambos Napoleón y emperador de Austria, Volta fue un hombre rico en sus últimos años y murió en 1827.

Obra clave

1769*Sobre las fuerzas de atracción del fuego eléctrico*

UN IMPUESTO SOBRE ELÉCTRICO ENERGÍA

CORRIENTE ELÉCTRICA Y RESISTENCIA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Georg Simón Ohm
(1789-1854)

ANTES
1775 Henry Cavendish anticipa una relación entre la diferencia de potencial y la corriente.

1800 Alessandro Volta inventa la primera fuente de corriente continua, la pila voltaica.

DESPUÉS
1840 El físico británico James Joule estudia cómo la resistencia convierte la energía eléctrica en calor.

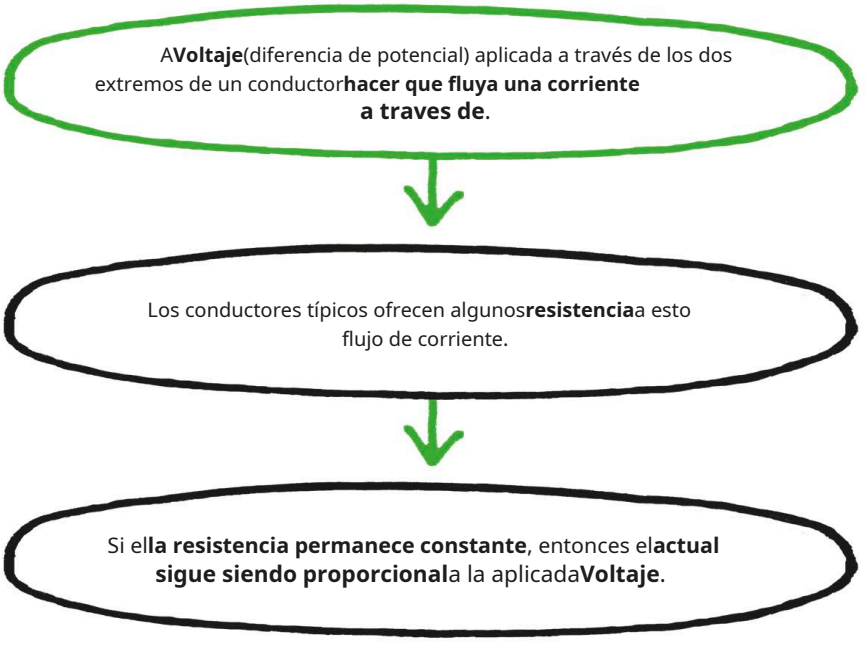
1845 Gustav Kirchhoff, un físico alemán, propone reglas que gobiernan la diferencia de corriente y potencial en los circuitos.

1911 La física holandesa Heike Kamerlingh Onnes descubre la superconductividad.

Ya en 1600, los científicos habían distinguido sustancias "eléctricas", como el ámbar y el vidrio, a partir de sustancias “no eléctricas”, como los metales, basándose en que sólo los primeros podían mantener una carga. En 1729, el astrónomo británico Stephen Gray aportó una nueva perspectiva a esta división de sustancias al reconocer que la electricidad (entonces todavía considerada un tipo de fluido) podía viajar de una sustancia eléctrica a otra a través de una sustancia no eléctrica.

Al considerar si la electricidad podría fluir a través de una sustancia en lugar de si podría almacenarse, estableció Gray.

Ver también: Carga eléctrica 124–127 · Potencial eléctrico 128–129 Hacer imanes 134–135 · El efecto motor 136-137 · La inducción y el efecto generador 138-141 Ondas electromagnéticas 192-195 · Partículas subatómicas 242–243



la distinción moderna entre conductores y aislantes. Fue la invención de Alessandro Volta de la celda electroquímica (batería) en 1800 lo que finalmente proporcionó a los científicos una fuente de carga eléctrica que fluye continuamente (una corriente eléctrica) para estudiar la conductancia y la resistencia.

Conductores y aislantes

Como demostró el invento de Volta, una corriente eléctrica sólo puede fluir si tiene un material conductor a través del cual viajar. Los metales son generalmente muy buenos conductores de electricidad; las cerámicas son generalmente buenos aislantes; otras sustancias, como una solución salina, agua o grafito, se encuentran en algún punto intermedio.

Los portadores de carga eléctrica en los metales son los electrones, que fueron descubiertos un siglo después. Los electrones de los átomos se encuentran en orbitales a diferentes distancias del núcleo, correspondientes a diferentes niveles de energía. En los metales, hay relativamente pocos electrones en los orbitales más externos, y estos electrones se "deslocalizan" fácilmente, moviéndose libre y aleatoriamente por todo el metal. El oro, la plata y el cobre son excelentes conductores porque sus átomos tienen un solo electrón externo, que se deslocaliza fácilmente.

Los electrolitos (soluciones como el agua salada) contienen iones cargados que pueden moverse con bastante facilidad. Por el contrario, en los aisladores, los portadores de carga están localizados (unidos a átomos particulares).

flujo de carga

La descripción moderna de la electricidad actual surgió a finales del siglo XIX, cuando finalmente se entendió que la corriente era un flujo de partículas cargadas positiva o negativamente. Para que una corriente fluya entre dos puntos, deben estar conectados por un conductor como un metal. cable, y los puntos deben estar en diferentes potenciales eléctricos (teniendo un desequilibrio en la carga entre los dos puntos). La corriente fluye de mayor potencial a menor (por convención científica, de positivo a negativo).

En los metales, los portadores de carga están cargados negativamente, por lo que una corriente que fluye en un alambre metálico de A a B es equivalente a electrones cargados negativamente que fluyen en la dirección opuesta (hacia el potencial superior o relativamente positivo). Los portadores de carga en otros materiales pueden ser positivos. Por ejemplo, el agua salada contiene iones de sodio cargados positivamente (entre otros), y su movimiento sería en la misma dirección que el flujo de corriente. La corriente se mide en unidades llamadas amperios, abreviatura de amperios. Una corriente de 1 amperio significa que alrededor de 6 billones de electrones pasan por un punto particular cada segundo.

En un alambre de cobre, los electrones deslocalizados se mueven aleatoriamente a más de 1.000 kilómetros por segundo. Debido a que se mueven en direcciones aleatorias, la velocidad neta (promedio) es cero, por lo que no hay velocidad neta.

> La belleza de la electricidad... ¿No es ese el poder? es misterioso y inesperado... pero eso está bajo la ley.
> **Michael Faraday**

> La corriente es de igual intensidad en todas partes. del circuito.
> **Jorge Ohm**

actual. La aplicación de una diferencia de potencial entre los extremos del cable crea un campo eléctrico. Este campo hace que los electrones libres y deslocalizados experimenten una fuerza neta hacia el extremo a alto potencial (porque están cargados negativamente), acelerándolos de modo que se desplacen a través del cable. Esta velocidad de deriva constituye la corriente y es muy pequeña, normalmente una fracción de milímetro por segundo en un cable.

Aunque los portadores de carga en un cable se mueven relativamente lentamente, interactúan entre sí a través de un campo eléctrico (debido a su carga) y un campo magnético (creado por su movimiento). Esta interacción es una onda electromagnética, que viaja extremadamente rápido. El alambre de cobre actúa como una "guía de ondas" y la energía electromagnética viaja a lo largo del alambre a (típicamente) entre el 80 y el 90 por ciento de lo que sería su velocidad en el vacío; por lo tanto, todos los electrones a lo largo del circuito comienzan a derivar casi instantáneamente, y una corriente está establecido.

Resistencia eléctrica

La propiedad de un objeto de oponerse a una corriente se llama resistencia. La resistencia (y su contraria, la conductancia) depende no sólo de las propiedades intrínsecas de un objeto (cómo están dispuestas las partículas que lo componen y, en particular, si los portadores de carga están deslocalizados), sino también de factores extrínsecos como su forma y si está sujeto a alta temperatura o presión. Un alambre de cobre más grueso, por ejemplo, es mejor conductor que uno más delgado de la misma longitud. Estos factores son comparables a los de los sistemas hidráulicos. Por ejemplo, es más difícil empujar agua a través de una tubería estrecha que a través de una ancha.

La temperatura también influye en la resistencia de un material. La resistencia de muchos metales disminuye con una disminución de la temperatura. Algunos materiales exhiben resistencia cero cuando se enfrían por debajo de una temperatura específica muy baja, una propiedad conocida como superconductividad.

La resistencia de un conductor puede variar con la diferencia de potencial (también conocida como voltaje) aplicada o la corriente que fluye a través de él. Por ejemplo, la resistencia de un filamento de tungsteno en una bombilla incandescente aumenta con la corriente. La resistencia de muchos conductores permanece constante a medida que varía la corriente o el voltaje. Estos conductores se conocen como conductores óhmicos, en honor a Georg Ohm, quien formuló una ley que relaciona el voltaje con la corriente.

Ley de Ohm

La ley de Ohm establecida es que la corriente que fluye a través de un conductor es proporcional al voltaje que lo atraviesa. Al dividir el voltaje (medido en voltios) por la corriente (medida en amperios) se obtiene un número constante, que es la resistencia del conductor (medida en ohmios).

Un alambre de cobre es un conductor óhmico: obedece la ley de Ohm siempre que su temperatura no aumente.

Georg Simón Ohm

Ohm nació en Erlangen (ahora Alemania) en 1789. Su padre, cerrajero, le enseñó matemáticas y ciencias. Fue admitido en la Universidad de Erlangen y conoció al matemático Karl Christian von Langsdorff. En 1806, el padre de Ohm, preocupado porque su hijo estaba desperdiciando sus talentos, lo envió a Suiza, donde enseñó matemáticas y continuó sus propios estudios.

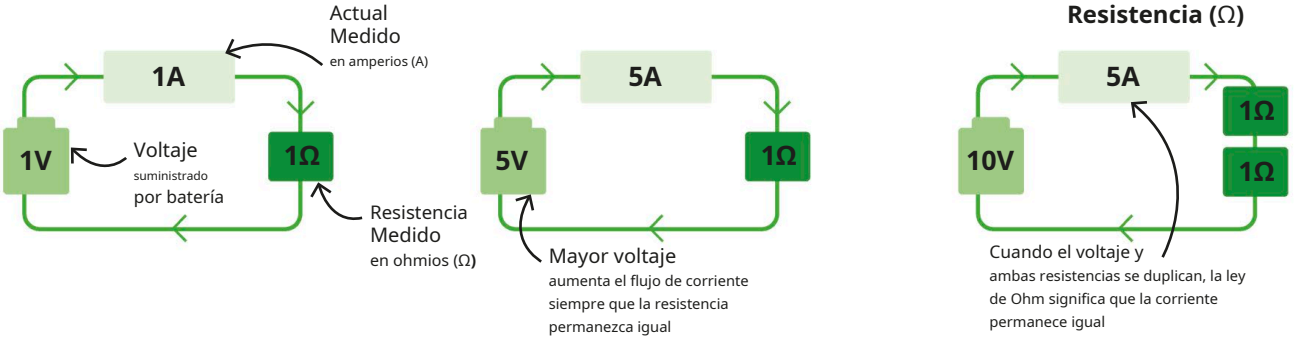
En 1811, Ohm regresó a Erlangen y obtuvo un doctorado. Se mudó a Colonia para enseñar en 1817. Después de enterarse de los descubrimientos de Hans Christian Ørsted, Comenzó a experimentar con la electricidad. Al principio, sus publicaciones no fueron bien recibidas, en parte debido a su enfoque matemático, pero también a causa de disputas por sus errores científicos. Más tarde, sin embargo, se le concedió el Royal Medalla Copley de la Sociedad en 1841 y fue nombrado catedrático de Física en la Universidad de Munich en 1852, dos años antes de su muerte.

Obra clave

1827 *El circuito galvánico investigado matemáticamente*

Ley de Ohm Encapsula el vínculo entre voltaje (diferencia de potencial), corriente y resistencia. Su fórmula (ver a la derecha) se puede usar para calcular cuánta corriente (en amperios) pasa a través de un componente dependiendo del voltaje (V) de la fuente de energía y la resistencia (medida en ohmios) de los elementos del circuito.

$$\text{Actual (A)} = \frac{\text{Voltaje (V)}}{\text{Resistencia (Ω)}}$$

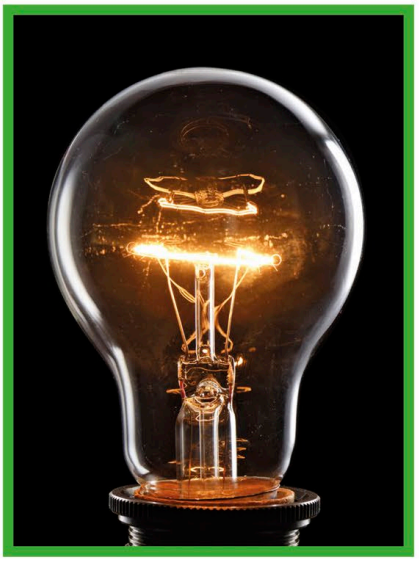


cambiar dramáticamente. La resistencia de los conductores óhmicos depende de factores físicos como la temperatura y no de la diferencia de potencial aplicada o de la corriente que fluye.

Ohm llegó a su ley mediante una combinación de experimentos y teoría matemática. En algunos de sus experimentos, hizo circuitos utilizando celdas electroquímicas para suministrar voltaje y una balanza de torsión para medir la corriente. Usó cables de diferentes longitudes y espesores para transportar la electricidad y notó la diferencia en corriente y resistencia que se produjo como resultado. Su trabajo teórico se basó en métodos geométricos para analizar conductores y circuitos eléctricos.

Ohm también comparó el flujo de corriente con la teoría de la conducción del calor de Fourier (que lleva el nombre del matemático francés Joseph Fourier). En esta teoría, la energía térmica se transfiere de una partícula a el siguiente en la dirección de un gradiente de temperatura. Al describir el flujo de corriente eléctrica, la diferencia de potencial a través de un conductor eléctrico es similar a la diferencia de temperatura entre dos extremos de un conductor térmico.

Sin embargo, la ley de Ohm no es una ley universal y no se aplica a todos los conductores ni en todas las circunstancias. Los llamados materiales no óhmicos incluyen los diodos y el filamento de tungsteno de las bombillas incandescentes. En esos casos, la resistencia depende de la diferencia de potencial aplicada (o de la corriente que fluye).



Filamento (incandescente) Las bombillas funcionan proporcionando una alta resistencia a la corriente eléctrica porque el cable (el filamento) es muy estrecho. Esta resistencia hace que la energía eléctrica se convierta en calor y luz.

calentamiento en julios

Cuanto mayor es la corriente en un conductor metálico, más colisiones se producen entre los electrones y la red iónica. Estas colisiones dan como resultado que la energía cinética de los electrones se convierta en calor. La ley de Joule-Lenz (llamada así en parte por James Prescott Joule, quien descubrió que la electricidad podía generar calor en 1840) establece que la cantidad de calor generado por un conductor que transporta una corriente es proporcional a su resistencia, multiplicada por el cuadrado de la actual.

El calentamiento Joule (también llamado calentamiento óhmico o calentamiento resistivo) tiene muchos usos prácticos. Es responsable, por ejemplo, del brillo de los filamentos de las lámparas incandescentes. Sin embargo, el calentamiento Joule también puede ser una problema significativo. En las redes de transporte de electricidad, por ejemplo, provoca importantes pérdidas de energía. Estas pérdidas se minimizan manteniendo la corriente en la red relativamente baja, pero la diferencia de potencial (voltaje) relativamente alta.

CADA METAL TIENE UN CIERTO FUERZA

HACER IMANES

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Hans Christian Ørsted
(1777–1851)

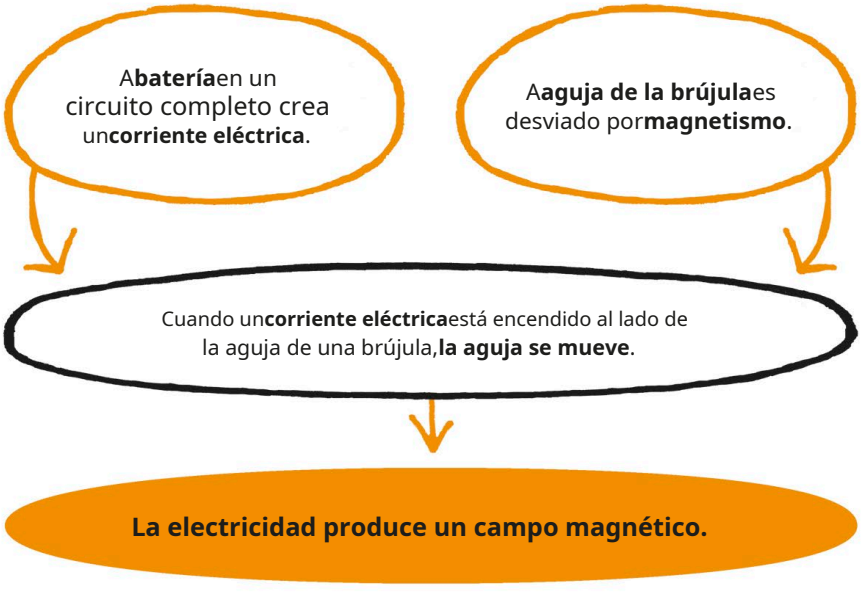
ANTES
1600 El astrónomo inglés William Gilbert se da cuenta de que la Tierra es un imán gigante.

1800 Alejandro Volta fabrica la primera batería, creando por primera vez un flujo continuo de corriente eléctrica.

DESPUÉS
1820 André-Marie Ampère desarrolla una teoría matemática del electromagnetismo.

1821 Michael Faraday crea el primer motor eléctrico y muestra electromagnético rotación en acción.

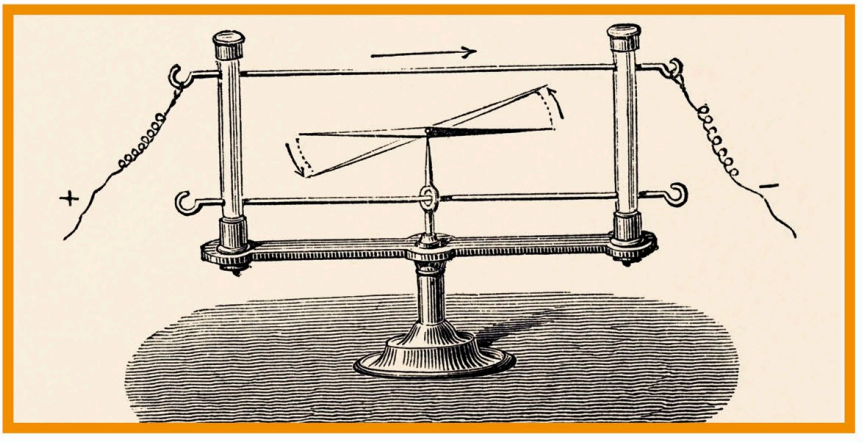
1876 Alexander Graham Bell, un físico escocés-estadounidense, inventa un teléfono que utiliza electroimanes y un
Imán permanente de herradura para transmitir vibraciones sonoras.



A finales del siglo XVIII, muchos magnéticos. y los científicos habían notado fenómenos eléctricos. Sin embargo, la mayoría creía que la electricidad y el magnetismo eran fuerzas totalmente distintas. Ahora se sabe que los electrones que fluyen producen un campo magnético y que los imanes que giran hacen que fluya una corriente eléctrica en un circuito completo. Esta relación entre electricidad y magnetismo es parte integral de casi todos los aparatos eléctricos modernos, desde auriculares hasta automóviles, pero fue descubierto por pura casualidad.

El descubrimiento casual de Ørsted
La invención de la pila voltaica (una de las primeras baterías) por Alessandro Volta en 1800 ya había abierto un campo completamente nuevo de estudio científico. Por primera vez, los físicos pudieron producir una corriente eléctrica constante. En 1820, el físico danés Hans Christian Ørsted estaba entregando un

Ver también: Magnetismo 122-123 · Carga eléctrica 124–127 La inducción y la efecto generador 138–141 Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142-147



conferencia a estudiantes de la Universidad de Copenhague. Se dio cuenta de que la aguja de una brújula se desviaba del norte magnético cuando encendía y apagaba una corriente eléctrica. Esta fue la primera vez que se demostró un vínculo entre una corriente eléctrica y un campo magnético. Ørsted llevó a cabo más experimentos y descubrió que una corriente produce un campo magnético concéntrico alrededor del cable por el que fluye.

Creando electroimanes

Cuatro años después del descubrimiento de Ørsted, el inventor británico William Sturgeon hizo un imán a partir de una pieza de hierro con forma de herradura y lo enrolló con 18 vueltas de alambre de cobre. Pasó una corriente eléctrica a través del cable, magnetizando la herradura lo suficiente como para atraer otras piezas de hierro.

En la década de 1830, el científico estadounidense Joseph Henry desarrolló aún más el electroimán, aislando alambre de cobre con hilo de seda y enrollando múltiples capas alrededor de núcleos de hierro. Uno de los imanes de Henry levantó un peso de 936 kg (2064 lb). En la década de 1850, los pequeños electroimanes se utilizaban ampliamente en receptores en el Red de telégrafos eléctricos de Estados Unidos. La ventaja de un electroimán es que se puede controlar su campo magnético. Mientras que la fuerza de un imán normal es constante, la fuerza de un electroimán se puede variar cambiando la corriente que fluye a través de su bobina de alambre (llamada solenoide). Sin embargo, los electroimanes sólo funcionan con un suministro continuo de energía eléctrica.

Al pasar una corriente eléctrica A través de un cable, Ørsted creó un campo magnético a su alrededor. Esto desvió la aguja de una brújula.

> El acuerdo de esta ley con la naturaleza será mejor visto por la repetición de experimentos que por una larga explicación.
>
> **Hans Christian Ørsted**

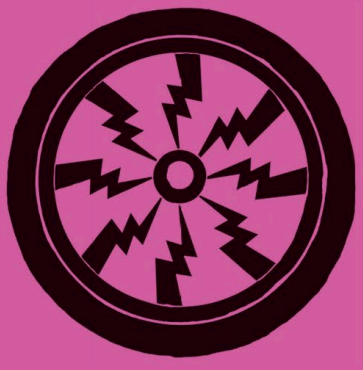
Hans Christian Ørsted

Nacido en Rudkøbing, Dinamarca, en 1777, Ørsted recibió principalmente educación en casa antes de Asistió a la Universidad de Copenhague en 1793. Después de obtener un doctorado en física y estética, recibió una beca de viaje y conoció al experimentador alemán Johann Ritter, quien despertó su interés en la posible conexión entre la electricidad y el magnetismo.

En 1806, Ørsted regresó a Copenhague para enseñar. Su descubrimiento en 1820 del vínculo entre las dos fuerzas le valió el reconocimiento internacional. Fue galardonado con el Real Medalla Copley de la Sociedad de Londres y más tarde fue nombrado miembro de la Real Academia Sueca de Ciencias y de la Academia Estadounidense de Artes y Ciencias. En 1825 fue el primer químico en producir aluminio puro. Murió en Copenhague en 1851.

Trabajos clave

1820 "Experimentos sobre el efecto de una corriente eléctrica sobre la aguja magnética"
1821 "Observaciones sobre el electromagnetismo"



ELECTRICIDAD

EN MOVIMIENTO

EL EFECTO MOTOR

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
André-Marie Ampère
(1775-1836)

ANTES

1600 William Gilbert realiza los primeros experimentos científicos sobre electricidad y magnetismo.

1820 Hans Christian Ørsted demuestra que una corriente eléctrica crea un campo magnético.

DESPUÉS

1821 Michael Faraday fabrica el primer motor eléctrico.

1831 Joseph Henry y Faraday utilizan la inducción electromagnética para crear el primer generador eléctrico, convirtiendo el movimiento en electricidad.

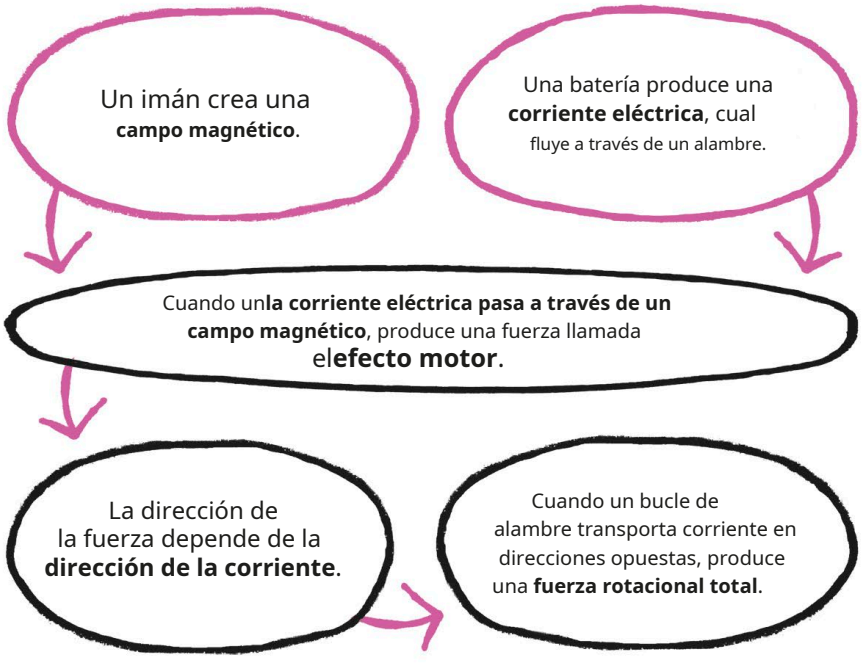
1839 Moritz von Jacobi, un ingeniero ruso, demuestra el primer motor eléctrico rotativo práctico.

1842 El ingeniero escocés Robert Davidson construye un motor eléctrico para impulsar una locomotora.

Basándose en el descubrimiento de Hans Christian Ørsted de la relación entre electricidad y magnetismo, el físico francés André-Marie Ampère realizó sus propios experimentos.

Ørsted había descubierto que una corriente que pasa a través de un cable forma un campo magnético alrededor del cable. Ampère se dio cuenta de que dos cables paralelos que transportaban electricidad Las corrientes se atraen o se repelen entre sí, dependiendo de si las corrientes fluyen en la misma dirección o en direcciones opuestas. Si la corriente fluye en la misma dirección en ambos, entonces los cables se sienten atraídos; si uno fluye en dirección opuesta, se repelen.

El trabajo de Ampère dio lugar a la ley que lleva su nombre, que establece que la acción mutua de dos



Ver también: Potencial eléctrico 128–129 · Hacer imanes 134–135 La inducción y el efecto generador 138-141 y las ecuaciones de Maxwell 142-147 Generar electricidad 148–151 · Campos de fuerza

Las longitudes de los cables que transportan corriente son proporcionales a sus longitudes y a las magnitudes de sus corrientes. Este descubrimiento fue la base de una nueva rama de la ciencia conocida como electrodinámica.

haciendo motores

Cuando un cable que transporta corriente se coloca en un campo magnético, está sujeto a una fuerza porque el campo magnético interactúa con el campo creado por la corriente. Si la interacción es lo suficientemente fuerte, el cable se mueve. La fuerza es máxima cuando la corriente fluye en ángulo recto con las líneas del campo magnético.

Si se coloca una espira de alambre, con dos lados paralelos, entre los polos de un imán de herradura, la interacción de la corriente en un lado provoca una fuerza hacia abajo, mientras que hay una fuerza hacia arriba en el otro lado. Esto hace que el bucle gire. En otras palabras,

La energía potencial eléctrica se convierte en energía cinética (movimiento), que puede realizar trabajo. Sin embargo, una vez que el bucle ha gira 180 grados, la fuerza se invierte, por lo que el bucle se detiene.

El fabricante de instrumentos francés Hippolyte Pixii descubrió la solución a este enigma en 1832 cuando unió un anillo de metal dividido en dos mitades a los extremos de una bobina con un núcleo de hierro. Este dispositivo, un conmutador, invierte la corriente en la bobina cada vez que gira media vuelta, por lo que el bucle continúa girando en la misma dirección.

Ese mismo año, el científico británico William Sturgeon inventó el primer motor eléctrico con conmutador capaz de hacer girar maquinaria. Cinco años después, el ingeniero estadounidense Thomas Davenport inventó un potente motor que giraba a 600 revoluciones por minuto y era capaz de accionar una imprenta y máquinas herramienta.

Un mundo electrodinámico

Con el paso de los años, la tecnología electrodinámica produjo motores más potentes y eficientes. Los pares (fuerzas de giro que crean movimiento de rotación) se incrementaron mediante el uso imanes más potentes, aumentando la corriente o utilizando cables muy finos para aumentar el número de bucles. Cuanto más cerca esté el imán de la bobina, mayor será la fuerza del motor.

Los motores de corriente continua (CC) todavía se utilizan para pequeños dispositivos que funcionan con baterías; En muchos electrodomésticos se utilizan motores universales, que utilizan electroimanes en lugar de imanes permanentes.

> el experimento investigación por la cual Ampère estableció la ley de la acción mecánica entre corrientes eléctricas es uno de los avances más brillantes de la ciencia.
> **James Clerk Maxwell**

André-Marie Ampère

Nacido de padres adinerados en Lyon, Francia, en 1775, se animó a André-Marie Ampère a educarse en casa, en una casa con una biblioteca bien surtida. A pesar de la falta de educación formal, ocupó un puesto docente en la nueva École Polytechnique de París en 1804 y fue nombrado profesor de matemáticas allí cinco años después.

Después de enterarse del descubrimiento del electromagnetismo por parte de Ørsted, Ampère concentró sus energías intelectuales en estableciendo el electrodinamismo como una nueva rama de la física. Él también especuló sobre la existencia de "moléculas electrodinámicas", anticipando el descubrimiento de los electrones. En reconocimiento a su trabajo, la unidad estándar de corriente eléctrica, el amperio, lleva su nombre. Murió en Marsella en 1836.

Trabajos clave

1827 *Memorias sobre la teoría matemática de Fenómenos electrodinámicos, deducidos únicamente de Experiencia*

EL DOMINIO DE MAGNÉTICO EFECTIVO

LA INDUCCIÓN Y EL EFECTO GENERADOR

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Michael Faraday(1791–1867)

ANTES
1820 Hans Christian Ørsted descubre el vínculo entre electricidad y magnetismo.

1821 Michael Faraday inventa un dispositivo que utiliza la interacción de la electricidad y el magnetismo para producir movimiento mecánico.

1825 William Sturgeon, un fabricante de instrumentos británico, construye el primer electroimán.

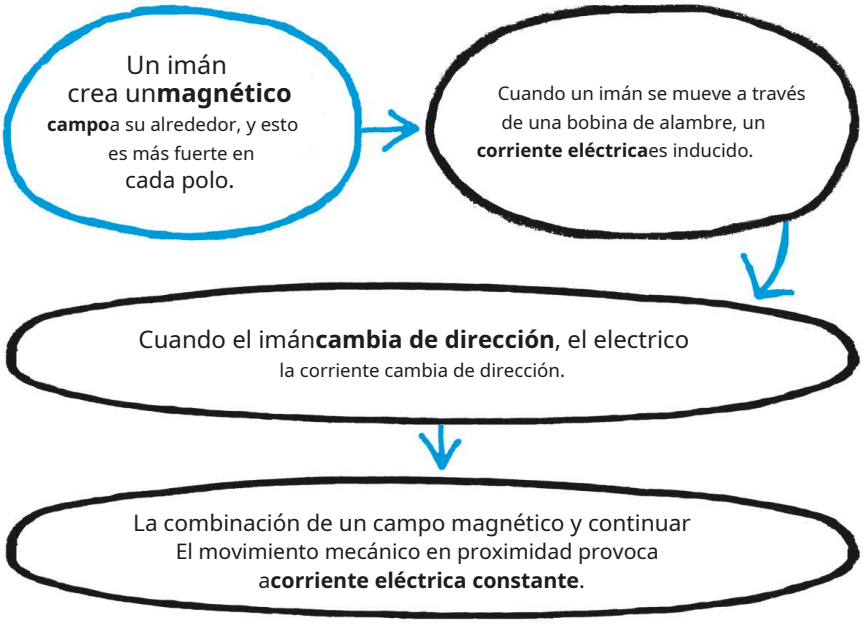
DESPUÉS
1865 James Clerk Maxwell presenta un artículo que describe las ondas electromagnéticas, incluidas las ondas de luz.

1882 Las primeras centrales eléctricas que utilizan generadores de electricidad se ponen en funcionamiento en Londres y Nueva York.

mi La inducción electromagnética es la producción de fuerza electromotriz (fem, o una diferencia de potencial) a través de un conductor eléctrico como resultado de un campo magnético cambiante. Su descubrimiento transformaría el mundo. Sigue siendo la base de la industria eléctrica actual e hizo posible la invención de generadores y transformadores eléctricos, que son el corazón de la tecnología moderna.

En 1821, inspirado por el descubrimiento realizado el año anterior por Hans Christian Ørsted de la relación entre electricidad y magnetismo, el físico británico Michael Faraday construyó dos dispositivos que tomaban

Ver también: Potencial eléctrico 128–129 · El efecto motor 136-137 Campos de fuerza y las ecuaciones de Maxwell 142-147 Generar electricidad 148–151



ventaja del llamado efecto motor (la creación de una fuerza cuando la corriente pasa a través de un conductor en un campo magnético). Estos dispositivos convertían la energía mecánica en energía eléctrica.

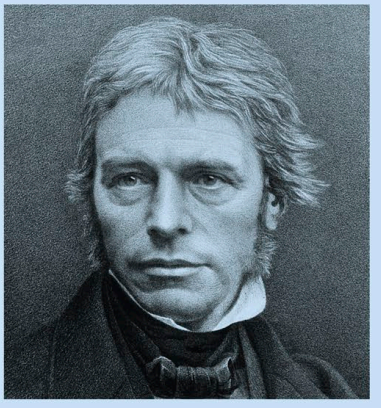
Faraday dirigió muchos experimentos para investigar la interacción de corrientes eléctricas, imanes y movimientos mecánicos. Estos culminaron en una serie de experimentos de julio a noviembre de 1831 que tendrían un impacto revolucionario.

El anillo de inducción

Uno de los primeros experimentos de Faraday en 1831 fue construir un aparato con dos bobinas de alambre aislado enrolladas alrededor de un anillo de hierro. Cuando pasaba una corriente a través de una bobina, se veía que fluía temporalmente una corriente en la otra, lo que aparecía en un galvanómetro, un dispositivo que se había inventado recientemente. Este efecto se conoció como la inducción mutua y el aparato, un anillo de inducción, fue el primer transformador del mundo (un dispositivo que transfiere energía eléctrica entre dos conductores).

Faraday también movió un imán a través de una bobina de alambre, haciendo que la corriente eléctrica fluyera en la bobina mientras lo hacía. Sin embargo, una vez que se detuvo el movimiento del imán, el

> Ahora estoy nuevamente ocupado con el electromagnetismo. y creo que he conseguido algo bueno.
> **Michael Faraday**



Michael Faraday

Hijo de un herrero londinense, Michael Faraday recibió una educación formal muy limitada. Sin embargo, cuando tenía 20 años, escuchó al renombrado químico Humphry Davy dando conferencias en la Royal Institution de Londres y le envió sus notas. Faraday fue invitado a convertirse en asistente de Davy y viajó por Europa con él desde 1813 hasta 1815.

Famoso por inventar el motor eléctrico en 1821, Faraday también ideó una forma temprana de mechero Bunsen, descubrió el benceno y formuló las leyes de la electrólisis. Pionero de las ciencias medioambientales, advirtió sobre los peligros de la contaminación del río Támesis. Hombre de principios sólidos, despreciaba los cultos pseudocientíficos de la época. El dio

Conferencias navideñas para el público, se negó a ofrecer consejos al gobierno sobre asuntos militares y rechazó el título de caballero. Murió en 1867.

Trabajos clave

1832 *Investigaciones Experimentales en Electricidad*
1859 *Un curso de seis conferencias sobre las diversas fuerzas de la materia*

El galvanómetro no registró corriente: el campo del imán solo permitía que la corriente fluyera cuando el campo aumentaba o disminuía. Cuando el imán se movía en la dirección opuesta, se veía nuevamente fluir una corriente en la bobina, esta vez en la dirección opuesta. Faraday también descubrió que fluía una corriente si la bobina se movía sobre un imán estacionario.

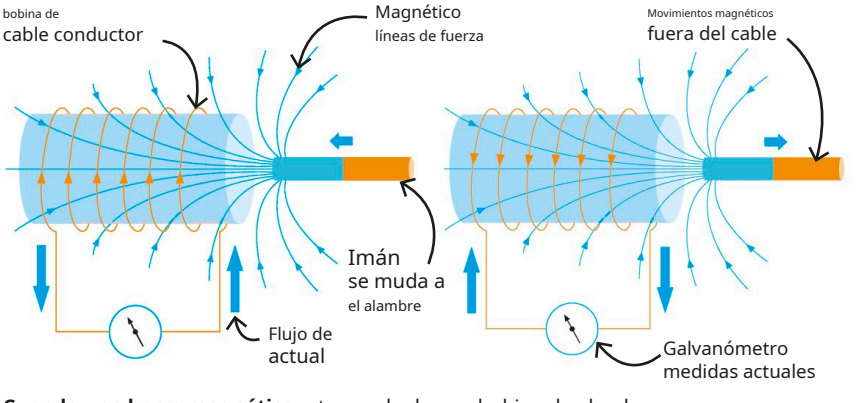
La ley de la inducción.

Al igual que otros físicos de la época, Faraday no entendía la verdadera naturaleza de la electricidad (que la corriente es un flujo de electrones), pero se dio cuenta de que cuando una corriente fluye en una bobina, produce un campo magnético. Si la corriente permanece estable, también lo hace el campo magnético y no se induce ninguna diferencia de potencial (en consecuencia, no se induce corriente) en la segunda bobina. Sin embargo, si la corriente en la primera bobina cambia, el cambio resultante en el campo magnético inducirá una diferencia de potencial en la otra bobina, por lo que fluirá una corriente.

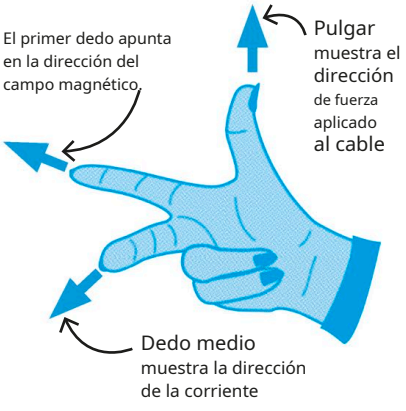
La conclusión de Faraday fue que no importa cómo se produzca un cambio en el entorno magnético de una bobina, éste provocará una corriente. ser inducido. Esto podría ocurrir como resultado de un cambio en la intensidad del campo magnético, o acercando o alejando el imán y la bobina, o girando la bobina o girando el imán.

Un científico estadounidense llamado Joseph Henry también había descubierto la inducción electromagnética en 1831, independientemente de Faraday, pero Faraday publicó primero y sus hallazgos se conocieron como la ley de inducción de Faraday. Sigue siendo el principio detrás de generadores, transformadores y muchos otros dispositivos.

En 1834, el físico estonio Emil Lenz desarrolló aún más el principio, afirmando que la diferencia de potencial inducida en un conductor por un campo magnético cambiante se opone al cambio en ese campo magnético. La corriente resultante de la diferencia de potencial genera un campo magnético que fortalecerá el campo magnético original si su fuerza se reduce y lo debilitará si su fuerza aumenta. Este principio se conoce como ley de Lenz. Un efecto de la ley de Lenz es que parte de la corriente eléctrica se pierde y se convierte en calor.



Cuando una barra magnéticaentra y sale de una bobina de alambre, produce una corriente eléctrica. La dirección de la corriente cambia según la dirección en que se mueve el imán. La corriente producida sería mayor con más bobinas o un imán más fuerte.



La regla de la mano derecha Muestra la dirección en la que fluirá una corriente en un cable cuando el cable se mueve en un campo magnético.

Más tarde, en la década de 1880, el físico británico John Ambrose Fleming describió una forma sencilla de calcular la dirección del flujo de corriente inducida: la "regla de la mano derecha". Esto utiliza el pulgar, el índice y el dedo medio de la mano derecha (sostenidos
perpendiculares entre sí) para indicar la dirección del flujo de corriente a partir de una diferencia de potencial inducida cuando un cable se mueve en un campo magnético (ver diagrama arriba).

La dinamo de Faraday

En 1831, el mismo año de los experimentos de Faraday con el anillo de inducción, también creó la primera dinamo eléctrica. Se trataba de un disco de cobre montado sobre ejes de latón que giraban libremente entre los dos polos de un imán permanente. Conectó el disco a un galvanómetro y descubrió que cuando giraba, el galvanómetro registraba una corriente que salía del centro del disco y fluía a través de un contacto de resorte hacia un circuito de alambre. El aparato pasó a ser conocido como disco de Faraday.

El experimento demostró que la combinación de un campo magnético y una mecánica continua

el movimiento en proximidad provocaba una corriente eléctrica constante. En un motor, el flujo de electrones a través de un cable en un campo magnético induce una fuerza sobre los electrones y por lo tanto sobre el cable, lo que hace que se mueva. Sin embargo, en el disco de Faraday (y otros generadores), se aplica la ley de inducción: se produce una corriente como resultado del movimiento de un conductor (el disco) en un campo magnético. Mientras que la característica del efecto motor es que la energía eléctrica se transforma en energía mecánica, en el efecto generador la energía mecánica se convierte en energía eléctrica.

Usos prácticos

Los descubrimientos de Faraday requirieron una experimentación minuciosa pero produjeron resultados muy prácticos. Proporcionaron conocimientos sobre cómo producir electricidad a una escala nunca antes imaginada.

Aunque el diseño básico del disco de Faraday era ineficiente, pronto otros lo adoptarían y lo convertirían en prácticos generadores de electricidad. En cuestión de meses, el fabricante de instrumentos francés Hippolyte Pixii había construido un generador de manivela basado en el diseño de Faraday. El

> por fin tengo
> tuvo éxito en
> iluminando un
> curva magnética...
> y en magnetizar
> un rayo de luz.
> **Michael Faraday**

Sin embargo, la corriente que producía se invertía cada media vuelta y nadie había descubierto todavía una forma práctica de aprovechar esta electricidad de corriente alterna (CA) para alimentar dispositivos electrónicos. La solución de Pixii fue utilizar un dispositivo llamado conmutador para convertir la corriente alterna en una corriente unidireccional. No fue hasta principios de la década de 1880 que el ingeniero eléctrico británico James Gordon construyó los primeros grandes generadores de CA.

La primera dinamo industrial se construyó en 1844 en Birmingham, Reino Unido, y se utilizó para galvanoplastia. En 1858, un faro de Kent se convirtió en la primera instalación alimentada por un generador eléctrico de vapor. Con el acoplamiento de dinamos a turbinas impulsadas por vapor, se hizo posible la producción comercial de electricidad. la primera practica

Los generadores de electricidad comenzaron a producirse en 1870, y en la década de 1880 áreas de Nueva York y Londres estaban iluminadas con electricidad producida de esta manera.

Un trampolín científico

El trabajo de Faraday sobre la relación entre el movimiento mecánico, el magnetismo y la electricidad también fue

> Ahora encontramos toda la materia sujeta.
> al dominio de Magnetic
> fuerzas, como antes se sabía
> que eran para la gravitación,
> Electricidad, cohesión.
> **Michael Faraday**

el trampolín para futuros descubrimientos científicos. En 1861, el físico escocés James Clerk Maxwell simplificó los conocimientos hasta la fecha sobre
Electricidad y magnetismo en 20 ecuaciones. Cuatro años más tarde, en un artículo presentado ante la Royal Society de Londres ("Una teoría dinámica del campo electromagnético"), Maxwell unificó los campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto: la radiación electromagnética, que se movía en ondas a una velocidad cercana a la de la luz. .
El artículo allanó el camino para el descubrimiento de las ondas de radio y para las teorías de la relatividad de Einstein.

Carga inalambrica

Muchos pequeños electrodomésticos que funcionan con baterías (como teléfonos móviles, cepillos de dientes eléctricos y marcapasos) ahora utilizan Cargadores de inducción, que eliminan la electricidad expuesta y reducen la dependencia de enchufes y cables. Dos bobinas de inducción muy próximas forman una
Transformador eléctrico, que carga la batería de un aparato. La bobina de inducción en una base de carga produce un campo electromagnético alterno, mientras que la bobina receptora El interior del dispositivo toma energía del campo y la convierte nuevamente en corriente eléctrica. En los pequeños electrodomésticos, las bobinas son pequeñas, por lo que deben estar en estrecho contacto para funcionar.

La carga inductiva también es posible para los vehículos eléctricos como alternativa a la carga mediante enchufe. En este caso, se pueden utilizar bobinas más grandes. Los vehículos robóticos guiados automáticamente, por ejemplo, no necesitan estar en contacto con la unidad de carga, sino que simplemente pueden acercarse y cargar.

LA LUZ MISMA ES UN ELECTROMAGNÉTICO DISTURBIO

CAMPOS DE FUERZA Y ECUACIONES DE MAXWELL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
James Clerk Maxwell
(1831-1879)

ANTES

1820 Hans Christian Ørsted descubre que un cable por el que circula corriente desvía la aguja de una brújula magnética.

1825 André-Marie Ampère sienta las bases para el estudio del electromagnetismo.

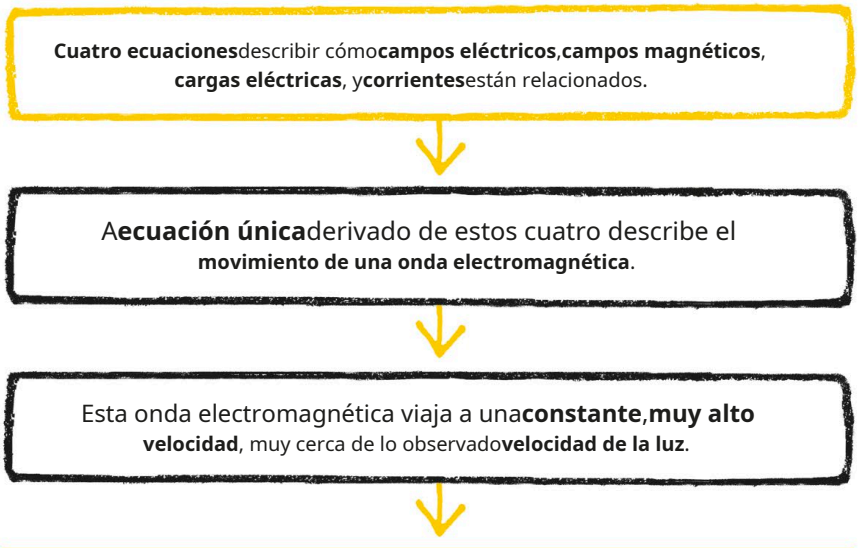
1831 Michael Faraday descubre la inducción electromagnética.

DESPUÉS

1892 El físico holandés Hendrik Lorentz investiga cómo funcionan las ecuaciones de Maxwell para diferentes observadores, lo que llevó a la teoría de la relatividad especial de Einstein.

1899 Heinrich Hertz descubre las ondas de radio mientras está investigando la teoría del electromagnetismo de Maxwell.

> No percibo en ninguna parte del espacio, ya sea... vacío o lleno de materia, nada más que fuerzas y las líneas en las que se ejercen.
>
> **Michael Faraday**



Ondas electromagnéticas y luz. son el mismo fenómeno.

El siglo XIX fue testigo de una serie de avances, tanto experimentales como deductivo, que permitiría el mayor avance en física desde las leyes de movimiento y gravitación de Isaac Newton: la teoría del electromagnetismo. El principal arquitecto de esta teoría fue el físico escocés James Clerk Maxwell, quien formuló un conjunto de ecuaciones basadas en el trabajo de, entre otros, Carl Gauss, Michael Faraday y André-Marie Ampère.

El genio de Maxwell consistió en colocar el trabajo de sus predecesores sobre una base matemática rigurosa, reconocer simetrías entre las ecuaciones y deducir su mayor significado a la luz de los resultados experimentales.

Publicada originalmente como 20 ecuaciones en 1861, la teoría del electromagnetismo de Maxwell describe con precisión cómo se entrelazan la electricidad y el magnetismo y cómo esta relación genera el movimiento ondulatorio. Aunque la teoría era a la vez fundamental y verdadera, la complejidad de las ecuaciones (y tal vez su naturaleza revolucionaria) significó que pocos físicos la entendieron de inmediato.

En 1873, Maxwell condensó las 20 ecuaciones en sólo cuatro y, en 1885, el matemático británico Oliver Heaviside desarrolló una presentación mucho más accesible que permitió a una comunidad más amplia de científicos apreciar su importancia. Incluso hoy en día, las ecuaciones de Maxwell siguen siendo válidas y útiles en todas las escalas excepto en las más pequeñas, donde los efectos cuánticos requieren su modificación.

Líneas de fuerza

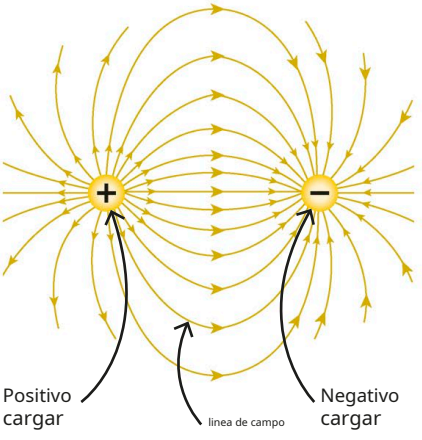
En una serie de experimentos realizados en 1831, Michael Faraday descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética: la generación de un campo eléctrico mediante un campo magnético variable. Faraday propuso intuitivamente un modelo de inducción que resultó notablemente cercano a nuestra comprensión teórica actual.

Ver también: Magnetismo 122-123 · Carga eléctrica 124–127 · Hacer imanes 134–135 · El efecto motor 136-137 · Monopolos magnéticos 159 · Ondas electromagnéticas 192-195 · La velocidad de la luz 275 · Relatividad especial 276–279

aunque su incapacidad para expresar el modelo matemáticamente significó que muchos de sus compañeros lo ignoraran. Irónicamente, cuando Maxwell tradujo la intuición de Faraday en ecuaciones, a su vez fue inicialmente ignorado, debido a la intimidante profundidad de sus matemáticas.

Faraday era muy consciente de un viejo problema de la física: cómo podía transmitirse instantáneamente una fuerza a través de un espacio "vacío" entre cuerpos separados. No hay nada en nuestra experiencia cotidiana que sugiera un mecanismo para esta "acción a distancia". Inspirándose en los patrones de las limaduras de hierro alrededor de los imanes, Faraday propuso que los efectos magnéticos eran transmitidos por líneas de fuerza invisibles que impregnaban el espacio alrededor de un imán. Estas líneas de fuerza apuntan en la dirección en la que actúa una fuerza y la densidad de las líneas corresponde a la fuerza de la fuerza.

Los resultados experimentales de Faraday fueron interpretados matemáticamente por primera vez por el físico británico JJ Thomson en 1845, pero en 1862 Maxwell, quien



Líneas de campo eléctrico Muestra la dirección del campo entre cargas. Las líneas se juntan en la carga negativa, se alejan (divergen) de la carga positiva y nunca pueden cruzarse.

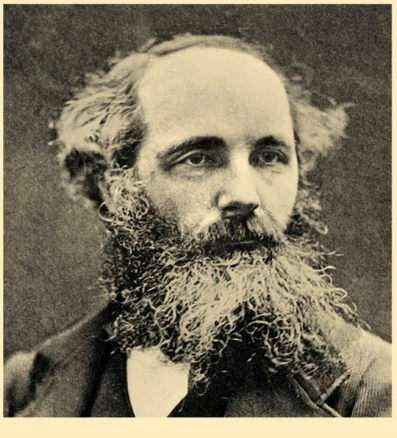
Asistió a las conferencias de Faraday en Londres y convirtió las "líneas de fuerza" descriptivas en el formalismo matemático de un campo. Cualquier cantidad que varíe con la posición se puede representar como un campo. Por ejemplo, la temperatura en una habitación se puede considerar un campo, con cada punto en el espacio definido por tres coordenadas y asociado con un número: la temperatura en ese punto.

Campos de fuerza

En conjunto, las líneas de "campo" o "flujo" magnético describen la región alrededor de un imán en la que Los cuerpos magnetizables "sienten" una fuerza. En este campo magnético, la magnitud de la fuerza en cualquier punto del espacio está relacionada con la densidad de las líneas de campo. A diferencia de un campo de temperatura, los puntos de un campo magnético también tienen una dirección, dada por la dirección de la línea de campo. Por lo tanto, un campo magnético es un campo vectorial: cada punto espacial tiene una fuerza y dirección asociadas, como el campo de velocidad del agua que fluye.

De manera similar, en un campo eléctrico, la línea de campo indica la dirección de la fuerza que siente una carga positiva, y la concentración de las líneas de campo indica la intensidad del campo. Al igual que los flujos de fluidos típicos, los campos eléctricos y magnéticos pueden cambiar con el tiempo (debido, por ejemplo, a cambios en los patrones climáticos), por lo que el vector en cada punto depende del tiempo.

James Clerk Maxwell



Nacido en Edimburgo en 1831, James Clerk Maxwell fue un niño precoz y presentó un trabajo sobre curvas matemáticas con sólo 14 años. Estudió en las universidades de Edimburgo y Cambridge. En 1856, fue nombrado profesor del Marischal College de Aberdeen, donde razonó correctamente que los anillos de Saturno estaban formados por muchas partículas sólidas pequeñas.

Los años más productivos de Maxwell fueron en el King's College de Londres a partir de 1860 y luego en Cambridge a partir de 1871, donde fue nombrado primer profesor de Física Experimental en el nuevo Laboratorio Cavendish. Hizo enormes contribuciones al estudio del electromagnetismo, la termodinámica, la teoría cinética de los gases y la teoría de la óptica y el color. Todo esto lo logró en una vida corta, antes de morir de cáncer en 1879.

Trabajos clave

1861 *Sobre las líneas físicas de fuerza* **1864** *Una teoría dinámica del campo electromagnético* **1870** *Teoría del calor* **1873** *Tratado sobre electricidad y magnetismo*

Las dos primeras ecuaciones de Maxwell son declaraciones de las leyes de Gauss para los campos eléctricos y magnéticos. Las leyes de Gauss son una aplicación del teorema de Gauss (también conocido como teorema de divergencia), que fue formulado por primera vez por Joseph-Louis Lagrange en 1762 y redescubierto por Gauss en 1813. En su forma más general, es una afirmación sobre campos vectoriales, como a medida que el fluido fluye a través de las superficies.

Gauss formuló la ley de los campos eléctricos alrededor de 1835, pero no la publicó durante su vida. Relaciona la "divergencia" de un campo eléctrico en un solo punto con la presencia de una carga eléctrica estática. La divergencia es cero si no hay carga en ese punto, positiva (las líneas de campo se alejan) para carga positiva y negativa (las líneas de campo convergen).

por carga negativa. La ley de Gauss para los campos magnéticos establece que la divergencia de un campo magnético es cero en todas partes; a diferencia de los campos eléctricos, no puede haber puntos aislados desde los cuales fluyan líneas de campo magnético hacia afuera o hacia adentro. En otras palabras, los monopolos magnéticos no existen y cada imán tiene un polo norte y un polo sur. Como consecuencia, las líneas del campo magnético siempre ocurren como bucles cerrados, por lo que la línea que sale del polo norte de un imán regresa al polo sur y continúa a través del imán para cerrar el bucle.

El Faraday y
Leyes de Ampère-Maxwell

La tercera de las ecuaciones de Maxwell es una declaración rigurosa de la ley de inducción de Faraday, que este último había deducido en 1831.

> La teoría especial de la relatividad debe su orígenes a Maxwell ecuaciones de la campo electromagnetico.
>
> **Albert Einstein**

La ecuación relaciona la tasa de cambio del campo magnético.Bcon el tiempo, a la "curvatura" del campo eléctrico. El rizo describe cómo circulan las líneas de campo eléctrico alrededor de un punto. A diferencia de los campos eléctricos creados por cargas puntuales estáticas, que tienen divergencia pero no curvatura,
Los campos eléctricos inducidos por campos magnéticos cambiantes tienen un carácter circulante, pero no divergencia, y pueden hacer que fluya corriente en una bobina.

La cuarta de las ecuaciones de Maxwell es una versión modificada de la ley de circuitos de André-Marie Ampère, que se formuló originalmente en 1826. Establece que una corriente eléctrica constante que fluye a través de un conductor creará un campo magnético circulante alrededor del conductor.

Impulsado por un sentido de simetría, Maxwell razonó que así como un campo magnético cambiante genera un campo eléctrico (ley de Faraday), un campo eléctrico cambiante debería generar un campo magnético. Para dar cabida a esta hipótesis, añadió la∂mi/∂t término (que representa la variación de un campo eléctrico,mi, a tiempo,t) a la ley de Ampère para formar lo que ahora se llama ley de Ampère-Maxwell. La adición de Maxwell a la ley no se basó

ecuaciones de maxwell

Las cuatro ecuaciones de Maxwell contienenlas variablesmiyB, que representa las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos, que varían con la posición y el tiempo. Pueden escribirse como este conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales parciales acopladas. Son "diferenciales" porque implican diferenciación, una operación matemática relacionada con cómo cambian las cosas. Son "parciales" porque las cantidades involucradas dependen de varias variables, pero cada término de la ecuación solo considera una parte de la variación, como la dependencia del tiempo. Están "acoplados" porque involucran las mismas variables y todas son simultáneamente verdaderas.

Nombre	Ecuación
Ley de Gauss para campos eléctricos.	- -mi- ---0
Ley de Gauss para campos magnéticos.	- -B-0
ley de faraday	- -mi- --B--t
Ley de Ampère-Maxwell	- -B- -0j--0-0(-mi--t)

j-Densidad de corriente eléctrica (corriente que fluye en una dirección determinada a través de una unidad de área)

B-Campo magnético

mi-Campo eléctrico

- -Diferencial operador

-0- Constante eléctrica

-t-Derivada parcial con respecto al tiempo

- - Densidad de carga eléctrica (carga por unidad de volumen)

-0-Constante magnética

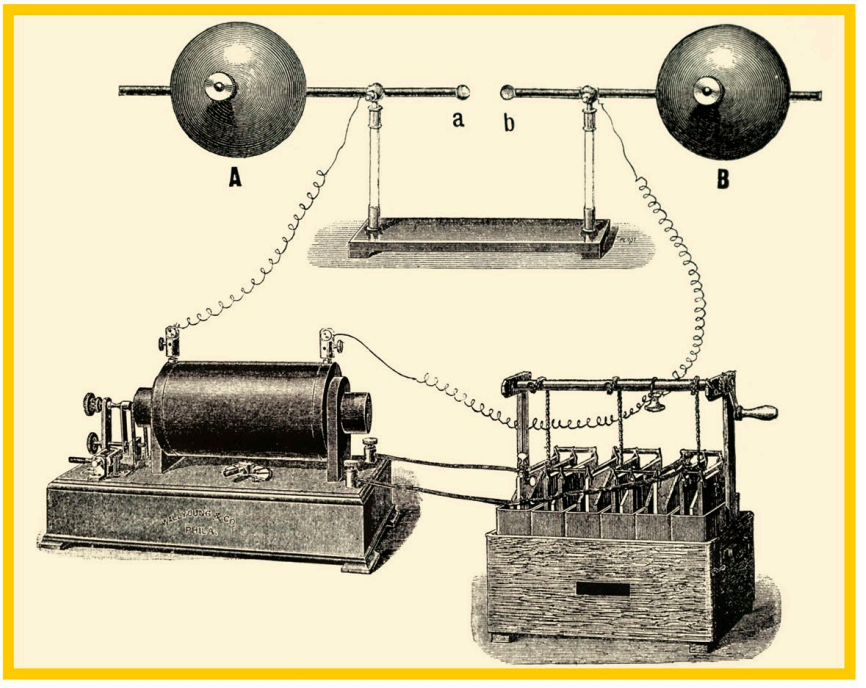
sobre cualquier resultado experimental, pero fue justificado por experimentos posteriores y avances en la teoría. La consecuencia más dramática de la adición de Maxwell a la ley de Ampère fue que sugería que los campos eléctricos y magnéticos estaban comúnmente asociados con una onda.

Ondas electromagnéticas y ligero

En 1845, Faraday observó que un campo magnético alteraba el plano de polarización de la luz (esto se conoce como efecto Faraday). El fenómeno de la polarización había sido descubierto por Christiaan Huygens allá por 1690, pero los físicos no entendían cómo funcionaba. El descubrimiento de Faraday no explicó directamente la polarización, pero sí estableció un vínculo entre la luz y el electromagnetismo, una relación que Maxwell pondría sobre una base matemática firme unos años más tarde.

A partir de sus diversas ecuaciones, Maxwell produjo una ecuación que describía el movimiento ondulatorio en el espacio tridimensional. Esta fue su ecuación de ondas electromagnéticas. La velocidad de la onda descrita por la ecuación viene dada por el término $1/\sqrt{(\text{-}_0 \text{mi}_0)}$. Maxwell no sólo había

> Resulta que el magnético y la fuerza eléctrica... es lo que en última instancia es lo más profundo... donde podemos empezar por explicar muchos otras cosas.
>
> **Richard Feynman**



estableció que los fenómenos electromagnéticos tienen un carácter ondulatorio (habiendo deducido que las perturbaciones en el campo electromagnético se propagan como una onda), pero que la velocidad de la onda, determinada Teóricamente, mediante comparación con la forma estándar de una ecuación de ondas, estaba muy cerca del valor determinado experimentalmente para la velocidad de la luz.

Como no se sabía que nada más que la luz viajara a una velocidad parecida a la de la luz, Maxwell concluyó que la luz y El electromagnetismo debe ser dos aspectos de un mismo fenómeno.

El legado de Maxwell

El descubrimiento de Maxwell animó a científicos como el físico estadounidense Albert Michelson a buscar una medición más precisa de la velocidad de la luz en la década de 1880. Sin embargo, la teoría de Maxwell predice todo un espectro de ondas, de las cuales la luz visible es sólo la más fácilmente percibida por los humanos. El poder y

Los experimentos de Heinrich Hertz.a finales del siglo XIX demostró lo que Maxwell había predicho y confirmó la existencia de ondas electromagnéticas, incluidas las ondas de radio.

La validez de la teoría se hizo obvia en 1899 cuando el físico alemán Heinrich Hertz, que estaba decidido a probar la validez de la teoría del electromagnetismo de Maxwell, descubrió las ondas de radio.

Las cuatro ecuaciones de Maxwell hoy son la base de una amplia gama de tecnologías, incluido el radar, la radio celular, los hornos microondas y la astronomía infrarroja. Cualquier dispositivo que utilice electricidad o imanes depende fundamentalmente de ellos. No se puede subestimar el impacto del electromagnetismo clásico: la teoría de Maxwell no sólo contiene los fundamentos de la teoría especial de la relatividad de Einstein, sino que también es, como primer ejemplo de una "teoría de campo", el modelo para muchas teorías posteriores en física.

EL HOMBRE VOLUNTAD

ENCARCELAR EL PODER DEL SOL

GENERAR ELECTRICIDAD

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Thomas Edison(1847-1931)

ANTES
1831 Michael Faraday muestra que un campo magnético cambiante interactúa con un circuito eléctrico para producir una fuerza electromagnética.

1832 Hippolyte Pixii desarrolla un prototipo de generador de CC basado en los principios de Faraday.

1878electrico aleman
El ingeniero Sigmund Schuckert construye una pequeña central eléctrica impulsada por vapor para iluminar una
Palacio bávaro.

DESPUÉS
1884 Ingeniero Carlos
Parsons inventa la turbina de vapor compuesta para una generación de energía más eficiente.

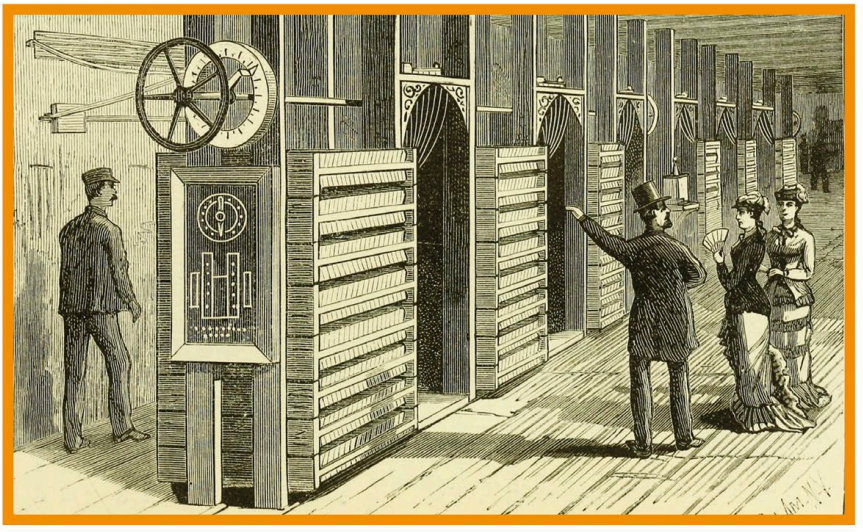
1954 Entra en funcionamiento la primera central nuclear en Rusia.

oh El 12 de enero de 1882, Edison Electric La estación de luz del viaducto de Holborn en Londres comenzó a generar electricidad por primera vez. Esta instalación, creación del prolífico inventor estadounidense Thomas Edison, fue la primera central eléctrica de carbón del mundo en producir electricidad para uso público. Unos meses más tarde, Edison abrió una versión más grande en Pearl Street en la ciudad de Nueva York. La capacidad de producir electricidad a gran escala sería uno de los impulsores clave de la Segunda Revolución Industrial de 1870-1914.

Hasta la década de 1830, la única forma de generar electricidad era mediante reacciones químicas dentro de una batería. En 1800,

Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com

Ver también: Magnetismo 122–123 · Potencial eléctrico 128–129 · Corriente eléctrica y resistencia 130–133. · hacer imanes 134–135 · El efecto motor 136-137 · La inducción y el efecto generador 138-141 · Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142-147



Thomas Edison instalado seis enormes dinamos en la planta de la estación Pearl Street en Manhattan, Nueva York, en 1882. Cada uno de los dinamos produjo suficiente electricidad para alimentar 1200 luces.

El científico italiano Alessandro Volta convirtió la energía química en electricidad para producir una corriente constante en una batería (más tarde conocida como pila voltaica). Aunque ésta fue la primera batería eléctrica, no era práctico, a diferencia del construido por el inventor británico John Daniell en 1836. Los componentes de una celda Daniell eran una olla de cobre llena de una solución de sulfato de cobre. en el cual se sumergió un recipiente de barro lleno de sulfato de zinc y un electrodo de zinc. Los iones cargados negativamente migraron a un electrodo y los iones cargados positivamente al otro, creando una corriente eléctrica.

La primera dinamo

En la década de 1820, el físico británico Michael Faraday experimentó con imanes y bobinas de alambre aislado. descubrió la relación entre campos magnéticos y eléctricos (ley de Faraday o principio de inducción) y utilizó este conocimiento para construir el primer generador eléctrico, o dinamo, en 1831. Éste consistía en un disco de cobre altamente conductor que giraba entre los polos de un imán en forma de herradura, cuyo eje magnético El campo produjo una corriente eléctrica.

La explicación de Faraday sobre los principios de la generación mecánica de electricidad (y su dinamo) se convertiría en la base de los generadores más potentes de electricidad. el futuro, pero a principios del siglo XIX todavía no existía la demanda de grandes tensiones.

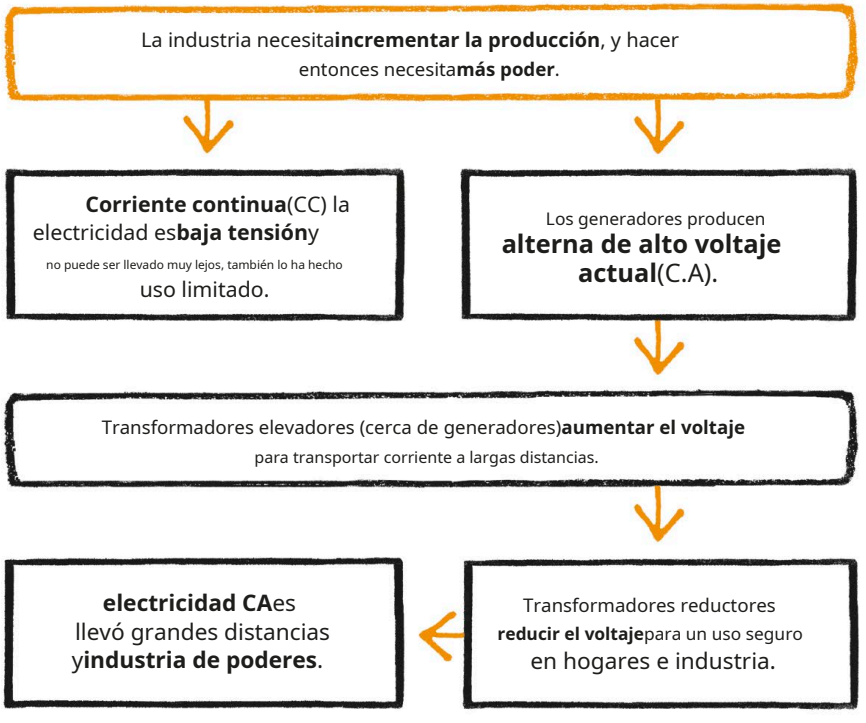
La electricidad para la telegrafía, la iluminación de arco y la galvanoplastia se suministraba mediante baterías, pero este proceso era muy caro y los científicos de varios países buscaron alternativas. El inventor francés Hippolyte Pixii, el ingeniero eléctrico belga Zenobe Gramme y el inventor alemán Werner von Siemens trabajaron de forma independiente para desarrollar el principio de inducción de Faraday con el fin de generar electricidad de manera más eficiente. En 1871, La dinamo de Gramme fue el primer motor eléctrico que entró en producción. Llegó a ser ampliamente utilizado en manufactura y agricultura.

La industria exigía procesos de fabricación cada vez más eficientes para aumentar la producción. Esta fue la época de las invenciones prolíficas, y Edison fue un ejemplo destacado, convirtiendo ideas en oro comercial en sus talleres y laboratorios. Su "momento de bombilla" llegó cuando ideó un sistema de iluminación para reemplazar las lámparas de gas y velas en hogares, fábricas y edificios públicos. Edison no inventó la bombilla, pero su lámpara de carbono de 1879 El diseño incandescente de filamento era económico, seguro y práctico para uso doméstico. Funcionaba con bajo voltaje, pero requería una forma de electricidad barata y constante para que funcionara.

Dínamos gigantes

Las centrales eléctricas de Edison transformaron la energía mecánica en electricidad. Una caldera alimentada por carbón convertía el agua en vapor a alta presión dentro de una máquina de vapor Porter-Allen. El eje del motor estaba conectado directamente a la armadura (bobina giratoria) del-

> haremos electricidad tan barato que sólo los ricos queman velas.
> **Thomas Edison**



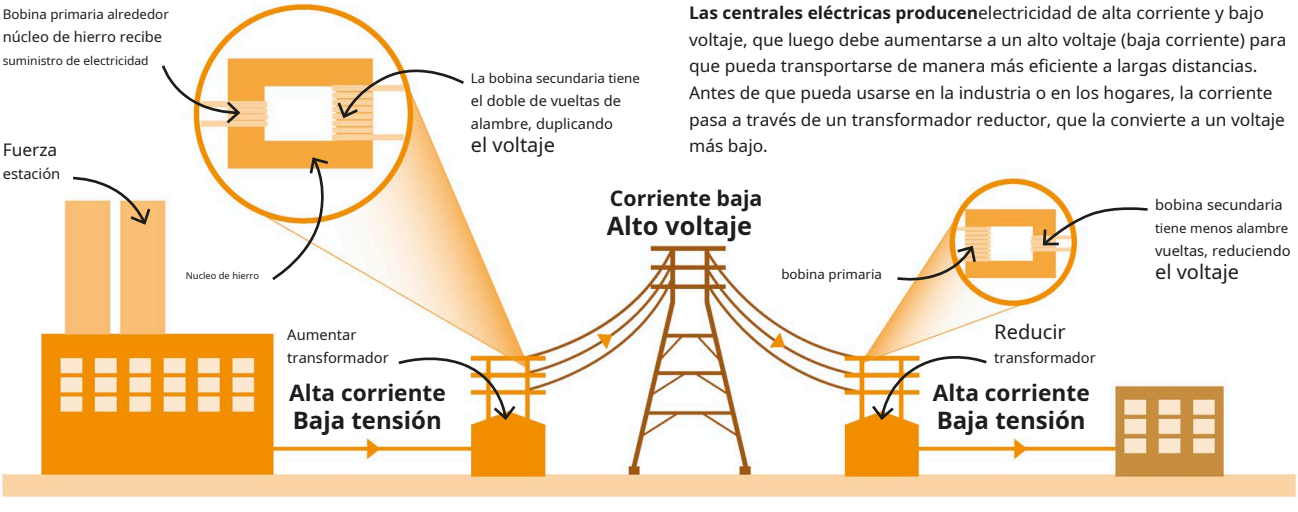
dinamo para una mayor eficiencia. Edison utilizó seis dinamos "Jumbo" en su planta de la estación Pearl Street, que eran cuatro veces más grandes que cualquiera jamás construida anteriormente. Cada uno pesaba 30 toneladas (27 toneladas métricas), producía 100 kilovatios de electricidad y podría iluminar 1.200 bombillas incandescentes. Alrededor de 110 voltios de corriente continua (CC) se transportaban bajo tierra en cables de cobre, que pasaban por tubos aislantes.

A finales del siglo XIX, no era posible convertir CC a alto voltaje y la energía transportada a una

El bajo voltaje y la alta corriente tenían un rango limitado debido a la resistencia en los cables. Para solucionar este problema, Edison propuso un sistema de plantas de energía locales que proporcionarían electricidad a los consumidores locales.
barrios. Debido al problema de transmitir a largas distancias, estas estaciones generadoras debían ubicarse dentro de 1 milla (1,6 km) del usuario. Edison había construido 127 de estas estaciones en 1887, pero estaba claro que grandes zonas de Estados Unidos no estarían cubiertas ni siquiera con miles de centrales eléctricas.

El auge de la electricidad CA

El ingeniero eléctrico serbio-estadounidense Nikola Tesla había sugerido una alternativa: utilizar generadores de corriente alterna (CA), en la que la polaridad del voltaje en una bobina se invierte cuando los polos opuestos de un imán giratorio pasan sobre ella. Esto invierte periódicamente la dirección de la corriente en el circuito; cuanto más rápido gira el imán, más rápido se invierte el flujo de corriente. Cuando
El ingeniero electrónico estadounidense William Stanley construyó el primer transformador viable en 1886, el voltaje de transmisión desde un



Las centrales eléctricas producenelectricidad de alta corriente y bajo voltaje, que luego debe aumentarse a un alto voltaje (baja corriente) para que pueda transportarse de manera más eficiente a largas distancias. Antes de que pueda usarse en la industria o en los hogares, la corriente pasa a través de un transformador reductor, que la convierte a un voltaje más bajo.

> La electricidad mortal de la corriente alterna no puede causar daño a menos que un hombre es tan tonto como para tragar toda una dinamo.
>
> **George Westinghouse**

El generador de CA podría “aumentarse” y la corriente simultáneamente “reducirse” en un cable de menor diámetro. A voltajes más altos, la misma potencia podría transmitirse a una corriente mucho más baja, y este alto voltaje podría transmitirse a largas distancias y luego “reducirse” nuevamente antes de usarse en un fábrica o casa.

El empresario estadounidense George Westinghouse se dio cuenta de los problemas del diseño de Edison, compró muchas patentes de Tesla y contrató a Stanley. En 1893, Westinghouse ganó un contrato para construir una presa y una central hidroeléctrica en las Cataratas del Niágara para aprovechar la inmensa energía hidráulica para producir electricidad. La instalación pronto transmitió CA para alimentar las empresas y hogares de Buffalo, Nueva York, y marcó el principio del fin de la CC como medio de transmisión predeterminado en los Estados Unidos.

Nuevas turbinas de vapor súper eficientes permitieron que la capacidad de generación se expandiera rápidamente. Alguna vez-

Paneles solares Están formados por decenas de células fotovoltaicas, que absorben la radiación solar, excitan electrones libres y generan un flujo de corriente eléctrica.

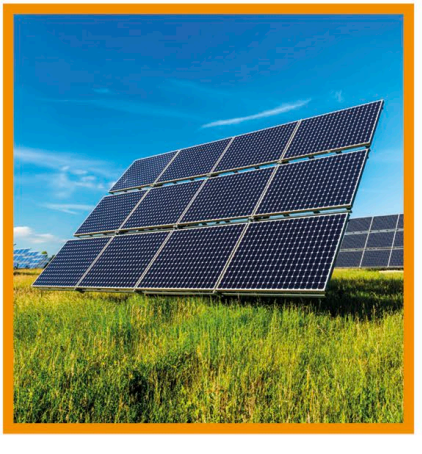
Las plantas operativas más grandes empleaban presiones de vapor más altas para lograr una mayor eficiencia. Durante el siglo XX, la generación de electricidad se multiplicó casi por diez. La transmisión de CA de alto voltaje permitió trasladar la energía desde centrales eléctricas distantes a centros industriales y urbanos a cientos o incluso miles de kilómetros de distancia.

A principios de siglo, el carbón era el principal combustible que se quemaba para crear el vapor necesario para impulsar las turbinas. Posteriormente se complementó con otros combustibles fósiles (petróleo y gas natural), virutas de madera y uranio enriquecido en las centrales nucleares.

Soluciones sostenibles

Con temores por el aumento del CO atmosfériconiveles, se han introducido alternativas sostenibles a los combustibles fósiles. La energía hidroeléctrica, que data del siglo XIX, produce hoy casi una quinta parte de la electricidad mundial. El poder del viento, las olas y las mareas ahora se aprovecha para impulsar turbinas y proporcionar electricidad. El vapor que se origina en las profundidades de la corteza terrestre produce energía geotérmica en partes del mundo como Islandia. Alrededor del 1 por ciento de la electricidad mundial ahora se genera mediante paneles solares. Los científicos también están trabajando para desarrollar

Pilas de combustible de hidrógeno.



Thomas Edison

Edison, uno de los inventores más prolíficos de todos los tiempos, tenía más de 1.000 patentes a su nombre en el momento de su muerte. Nació en Milan, Ohio, y fue principalmente educado en casa. En una señal temprana de su talento empresarial, obtuvo derechos exclusivos para vender periódicos mientras trabajaba como operador de telégrafos en Grand Trunk Railway. Su primer invento fue un registrador de votos electrónico.

A la edad de 29 años, Edison estableció un laboratorio de investigación industrial en Nueva Jersey. Algunas de sus patentes más famosas fueron para mejoras radicales en dispositivos existentes, como el teléfono, el micrófono y la bombilla. Otros fueron revolucionarios, incluido el fonógrafo en 1877. Luego fundó la General Electric Company en 1892. Edison era un

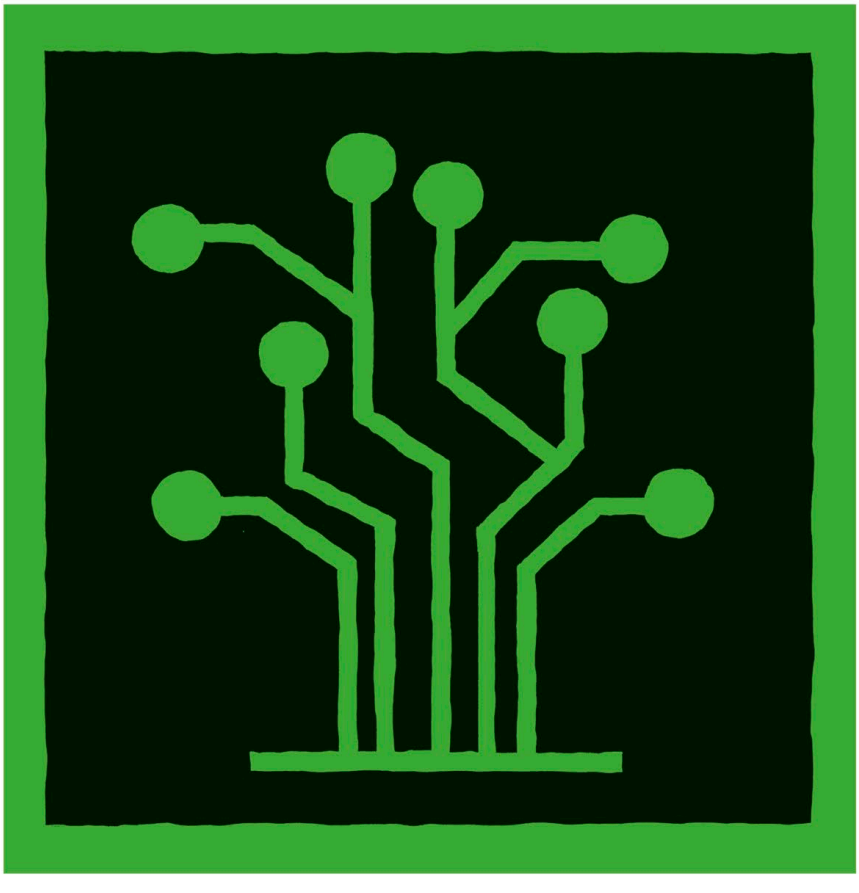
Vegetariano y orgulloso de no haber inventado nunca las armas.

Obra clave

2005*Los artículos de Thomas A. Edison: electrificando Nueva York y el extranjero, abril de 1881 a marzo de 1883*

UN PEQUEÑO PASO EN EL CONTROL DE LA NATURALEZA

ELECTRÓNICA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Juan Bardeen(1908-1991)

ANTES
1821físico alemán
Thomas Seebeck observa un efecto termoeléctrico en un semiconductor.

1904 El ingeniero británico John Ambrose Fleming inventa el diodo de tubo de vacío.

1926 Austriaco-estadounidense El ingeniero Julius Lilienfeld patenta el FET (transistor de efecto de campo).

1931 El físico británico Alan Herries Wilson establece la teoría de la conducción en bandas.

DESPUÉS
1958–59 Los ingenieros estadounidenses Jack Kilby y Robert Noyce desarrollan el circuito integrado.

1971 Intel Corporation lanza el primer microprocesador.

La electrónica abarca la ciencia, tecnología e ingeniería de componentes y circuitos para la generación, transformación y control de señales eléctricas. Los circuitos electrónicos contienen componentes activos, como diodos y transistores, que conmutan, amplifican, filtran o cambian de otro modo las señales eléctricas. Los componentes pasivos, como celdas, lámparas y motores, normalmente solo convierten entre energía eléctrica y otras formas de energía, como calor y luz.

El término "electrónica" se aplicó por primera vez al estudio del electrón, la partícula subatómica que transporta la electricidad en los sólidos. El descubrimiento del electrón en 1897 por el

Ver también: Carga eléctrica 124–127 · Corriente eléctrica y resistencia 130–133. Aplicaciones cuánticas 226–231 · Partículas subatómicas 242–243

La electrónica es la **uso de electricidad** para producir señales que **llevar información** y **dispositivos de control**.

Para producir estas señales, el **flujo de corriente eléctrica** debe ser controlado con gran precisión.

Semiconductores contener a **número variable de portadores de carga** (partículas que transportan electricidad).

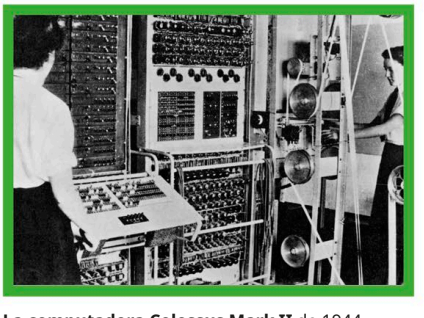
dopaje (agregar impurezas a) semiconductores de silicio **afecta la naturaleza de sus portadores de carga**, habilitando la corriente ser controlado con precisión.

En la mayoría de los semiconductores, el componente electrónico más importante, **el transistor**, está hecho de **regiones de silicio dopado**. Puede amplificar señales eléctricas o encenderlas o apagarlas.

El físico británico JJ Thomson generó un estudio científico sobre cómo se podría aprovechar la carga eléctrica de la partícula. En 50 años, esta investigación condujo a la invención del transistor, allanando el camino para la concentración de señales eléctricas en dispositivos cada vez más compactos, procesados a velocidades cada vez mayores. Esto condujo a los espectaculares avances en ingeniería y tecnología electrónica de la revolución digital que comenzó a finales del siglo XX y continúa en la actualidad.

Válvulas y corrientes.

Los primeros componentes electrónicos se desarrollaron a partir de tubos de vacío: tubos de vidrio a los que se les extraía el aire. En 1904, el físico británico John Ambrose Fleming desarrolló el tubo de vacío hasta convertirlo en un diodo termoiónico, que constaba de dos electrodos (un cátodo y un ánodo) dentro del tubo. El cátodo metálico se calentó mediante un circuito eléctrico hasta el punto de emisión termoiónica, por lo que sus electrones cargados negativamente ganaron suficiente energía para abandonar el superficie y moverse a través del tubo. Cuando se aplicó un voltaje a través de los electrodos, el ánodo se volvió relativamente positivo, por lo que los electrones fueron atraídos hacia él y fluyó una corriente. Cuando se invirtió el voltaje, los electrones emitidos por el cátodo fueron repelidos por el ánodo y no fluyó corriente. El diodo conducía sólo cuando el ánodo era positivo en relación con el cátodo y, por lo tanto, actuaba como una válvula unidireccional, que podía usarse para convertir CA (corriente alterna).



La computadora Colossus Mark II de 1944 utilizó una gran cantidad de válvulas para realizar los complejos cálculos matemáticos necesarios para decodificar los sistemas de cifrado nazis de Lorenz.

en CC (corriente continua). Esto permitió la detección de ondas de radio de CA, por lo que la válvula encontró una amplia aplicación como demodulador (detector) de señales en los primeros tiempos.
Receptores de radio AM (modulación de amplitud).

En 1906, el inventor estadounidense Lee de Forest añadió un tercer electrodo en forma de rejilla al diodo de Fleming para crear un triodo. Un voltaje pequeño y variable aplicado a través del nuevo electrodo y el cátodo cambió el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo, creando una gran variación de voltaje; en otras palabras, el pequeño voltaje de entrada se amplificó para crear un voltaje de salida grande. El triodo se convirtió en un componente vital en el desarrollo de la radiodifusión y la telefonía.

Física del estado sólido

Aunque en las décadas siguientes las válvulas permitieron mayores avances en la tecnología, como la televisión y las primeras computadoras, eran voluminosas, frágiles, consumían mucha energía y tenían una frecuencia de funcionamiento limitada. El coloso británico

> Es en una superficie donde muchos de nuestros más interesantes y ocurren fenómenos útiles.
> **Walter Brattain**

Las computadoras de la década de 1940, por ejemplo, tenían cada una hasta 2.500 válvulas, ocupaban una habitación entera y pesaban varias toneladas.

Todas estas limitaciones se resolvieron con la transición a la electrónica basada no en tubos de vacío sino en las propiedades electrónicas de los sólidos semiconductores, como los elementos boro, germanio y silicio. Esto, a su vez, nació de un interés creciente a partir de la década de 1940 por la física del estado sólido: el estudio de esos

Propiedades de los sólidos que dependen de la estructura microscópica a escalas atómica y subatómica, incluido el comportamiento cuántico.

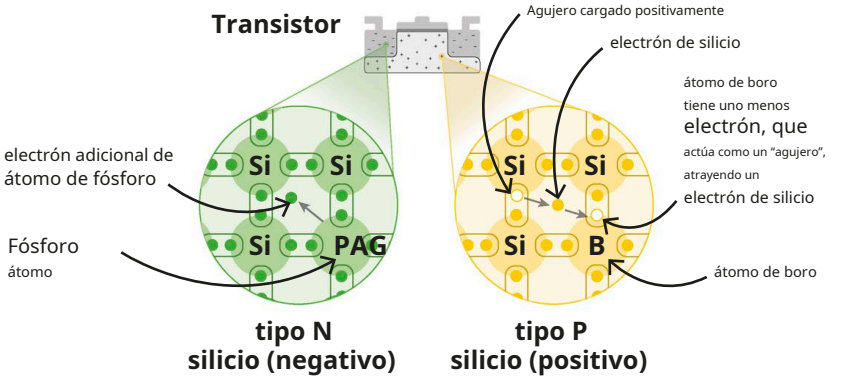
Un semiconductor es un sólido con una conductividad eléctrica que varía entre la de un conductor y la de un aislante, es decir, ni alta ni baja. De hecho, tiene el potencial de controlar el flujo de corriente eléctrica. Los electrones en todos los sólidos ocupan distintos niveles de energía agrupados en bandas, llamadas bandas de valencia y de conducción. La banda de valencia contiene el nivel de energía más alto que ocupan los electrones cuando se unen con átomos adyacentes. La banda de conducción tiene niveles de energía aún más altos y sus electrones no están unidos a ningún átomo en particular, pero tienen suficiente energía para moverse por todo el sólido, y así conducir corriente. En los conductores, las bandas de valencia y conducción se superponen, por lo que los electrones involucrados en el enlace también pueden contribuir a la conducción. En los aisladores, existe una gran banda prohibida, o diferencia de energía, entre las bandas de valencia y de conducción que mantiene a la mayoría de los electrones unidos pero no conductores. Los semiconductores tienen una pequeña banda prohibida. Cuando se les da un poco de energía extra (aplicando calor, luz o voltaje), sus electrones de valencia pueden migrar a la banda de conducción, cambiando las propiedades del material de aislante a conductor.

Control mediante el dopaje

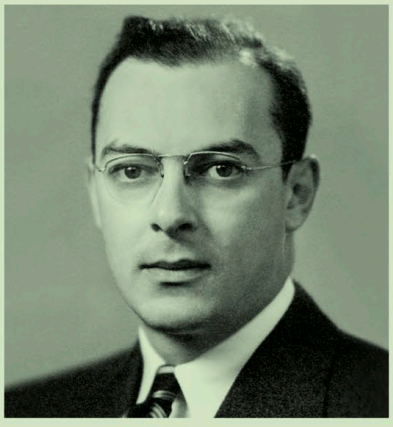
En 1940, un descubrimiento casual añadió otra dimensión al potencial eléctrico de los semiconductores. Al probar un cristal de silicio, Russell Ohl, un electroquímico estadounidense, descubrió que producía diferentes efectos eléctricos si se probaba en diferentes lugares. Cuando se examinó, el cristal parecía tener regiones que contenían distintas impurezas. Uno, el fósforo, tenía un pequeño exceso de electrones; otro, boro, tenía una pequeña deficiencia. Quedó claro que pequeñas cantidades de impurezas en un cristal semiconductor pueden cambiar drásticamente sus propiedades eléctricas. La introducción controlada de impurezas específicas para obtener las propiedades deseadas se conoció como "dopaje".

Las regiones de un cristal pueden doparse de diferentes maneras. En un cristal de silicio puro, por ejemplo, cada átomo tiene cuatro electrones de enlace (valencia) que comparte con sus vecinos. Se pueden dopar regiones del cristal introduciendo algunos átomos de fósforo (que tiene cinco electrones de valencia) o de boro (con tres electrones de valencia). La región dopada con fósforo tiene electrones "libres" adicionales y se denomina semiconductor tipo n (n para negativo). La región dopada con boro, llamada semiconductor tipo p (p de positivo) tiene menos electrones, lo que crea "agujeros" portadores de carga. Cuando los dos tipos se unen, se llama unión ap-n. Si se aplica un voltaje al lado tipo p, atrae electrones del lado tipo n y fluye corriente. Un cristal con una unión p-n.

La mayoría de los semiconductores en transistores.están hechos de silicio (Si), que ha sido dopado con impurezas para controlar el flujo de corriente a través de él. La adición de átomos de fósforo al silicio crea un semiconductor de tipo n, con electrones cargados negativamente que pueden moverse libremente. La adición de átomos de boro crea un semiconductor tipo p, con "agujeros" cargados positivamente que pueden moverse a través del silicio.



Juan Bardeen



Nacido en 1908, John Bardeen tenía sólo 15 años cuando comenzó sus estudios de ingeniería eléctrica en la Universidad local de Wisconsin. Después de graduarse, se unió a los laboratorios de Gulf Oil en 1930 como geofísico, desarrollando estudios magnéticos y gravitacionales. En 1936, obtuvo un doctorado en física matemática de la Universidad de Princeton y posteriormente investigó la física del estado sólido en Harvard. Durante la Segunda Guerra Mundial, trabajó para la Marina de los EE. UU. en torpedos y minas.

Después de un período productivo en los Laboratorios Bell, donde Bardeen inventó el transistor, en

En 1957 fue coautor de la teoría de la superconductividad BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer). Compartió dos premios Nobel de Física: en 1956 (por el transistor) y nuevamente en 1972 (por la teoría BCS). Murió en 1991.

Trabajos clave

1948"El transistor, un triodo semiconductor"
1957"Teoría microscópica de la superconductividad"
1957"Teoría de la superconductividad"

Actúa como un diodo: conduce una corriente a través de la unión en una sola dirección.

Avances en transistores

Después de la Segunda Guerra Mundial, continuó la búsqueda de un reemplazo eficaz para el tubo o válvula de vacío. En Estados Unidos, la Bell Telephone Company reunió a un equipo de físicos estadounidenses, entre ellos William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain, en su laboratorios en Nueva Jersey para desarrollar una versión semiconductora del amplificador triodo.

Bardeen era el principal teórico del grupo y Brattain el experimentador. Después de intentos fallidos de aplicar un campo eléctrico externo a un cristal semiconductor para controlar su conductividad, un avance teórico de Bardeen desplazó la atención hacia la superficie del semiconductor como el sitio clave de los cambios en la conductividad. En 1947, el grupo comenzó a experimentar con contactos eléctricos sobre un cristal de germanio. Debajo se colocó un tercer electrodo (la "base"). Para que el dispositivo funcionara como se deseaba, los dos contactos superiores debían estar muy juntos, lo cual se logró envolviendo una lámina de oro alrededor de la esquina de un trozo de plástico y cortando la lámina a lo largo del borde para crear dos contactos muy espaciados. Cuando se presionaron sobre el germanio, formaron un amplificador que podía aumentar la señal que llegaba a la base. Esta primera versión funcional se conocía simplemente como "punto de contacto", pero pronto pasó a ser conocida como "transistor".

El transistor de contacto puntual era demasiado delicado para una producción confiable en grandes volúmenes, por lo que en 1948 Shockley comenzó a trabajar en un nuevo transistor. Basado en la unión del semiconductor p-n, el transistor de unión "bipolar" de Shockley se construyó bajo el supuesto de que los agujeros cargados positivamente creados por el dopaje penetraban el cuerpo del semiconductor en lugar de simplemente flotar sobre su superficie. El transistor consistía en un sándwich de material tipo p entre dos capas tipo n (npn), o tipo n intercalado entre capas tipo p (pnp), con los semiconductores separados por uniones p-n. En 1951, Bell estaba produciendo en masa el transistor. Aunque al principio se utilizaba principalmente en audífonos y radios, El dispositivo pronto impulsó un crecimiento espectacular en el mercado de la electrónica y comenzó a reemplazar los tubos de vacío en las computadoras.

Poder de procesamiento

Los primeros transistores se fabricaron con germanio, pero este fue reemplazado como material base por el silicio, mucho más abundante y versátil. Sus cristales forman en su superficie una fina capa aislante de óxido. Utilizando una técnica llamada fotolitografía, esta capa se puede diseñar con precisión microscópica para crear patrones altamente complejos de regiones dopadas y otras características del cristal.

La llegada del silicio como base y los avances en el diseño de transistores impulsaron una rápida miniaturización. Esto condujo primero a los circuitos integrados (circuitos completos en un solo cristal) a finales de la década de 1960, y en 1971 al microprocesador Intel 4004: una CPU (unidad central de procesamiento) completa en un chip de 3 a 4 mm, con más de 2.000 transistores. Desde entonces, la tecnología se ha desarrollado a una velocidad increíble, hasta el punto de que un chip CPU o GPU (unidad de procesamiento de gráficos) puede contener hasta 20 mil millones de transistores.

ANIMAL ELECTRICIDAD

BIOELECTRICIDAD

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES

Jose Erlanger(1874-1965), **Herbert Spencer Gasser** (1888-1963)

ANTES

1791 El físico italiano Luigi Galvani publica sus hallazgos sobre la "electricidad animal" en una anca de rana.

1843 El médico alemán Emil du Bois-Reymond demuestra que la conducción eléctrica viaja en ondas a lo largo de los nervios.

DESPUÉS

1944 Los fisiólogos estadounidenses Joseph Erlanger y Herbert Gasser reciben el Premio Nobel de Fisiología o Medicina por sus trabajos sobre las fibras nerviosas.

1952 Los científicos británicos Alan Hodgkin y Andrew Huxley demuestran que las células nerviosas comunicarse con otros células mediante flujos de iones; esto se conoce como modelo de Hodgkin-Huxley.

La ioelectricidad permite que funcione todo el sistema nervioso de un animal. Permite al cerebro interpretar el calor, el frío, el peligro, el dolor y el hambre, y regular el movimiento de los músculos, incluidos los latidos del corazón y la respiración.

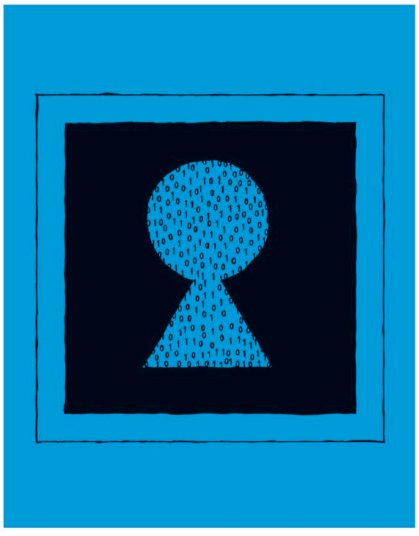
Uno de los primeros científicos en estudiar la bioelectricidad fue Luigi Galvani, quien acuñó el término "electricidad animal" en 1791. Observó la contracción muscular en una anca de rana disecada cuando un nervio cortado y un músculo se conectaban con dos piezas de metal. En 1843, Emil du Bois-Reymond demostró que las señales nerviosas de los peces son eléctricas y, en 1875, el fisiólogo británico Richard Caton registró los campos eléctricos producidos por los cerebros de conejos y monos.

El avance en

La comprensión de cómo se producían los impulsos eléctricos llegó en 1932, cuando Joseph Erlanger y Herbert Gasser descubrieron que diferentes fibras en el mismo cordón nervioso poseen diferentes funciones, conducen impulsos a diferentes velocidades y son estimuladas con diferentes intensidades. A partir de la década de 1930, Alan Hodgkin y Andrew Huxley utilizaron el axón gigante (parte de una célula nerviosa) de un calamar veteado para estudiar cómo los iones (átomos o moléculas cargados) entran y salen de las células nerviosas. Descubrieron que cuando los nervios transmiten mensajes, los iones de sodio, potasio y cloruro crean pulsos de potencial eléctrico de rápido movimiento.

Tiburones y algunos otros peces. Tienen poros llenos de gelatina llamados ampollas de Lorenzini, que detectan cambios en los campos eléctricos del agua. Estos sensores pueden detectar un cambio de tan solo 0,01 microvoltios.

Ver también: Magnetismo 122–123 · Carga eléctrica 124–127 Potencial eléctrico 128–129 · Corriente eléctrica y resistencia 130–133. Hacer imanes 134–135



UN TOTALMENTE INESPERADO CIENTÍFICO

DESCUBRIMIENTO

ALMACENAMIENTO DE DATOS

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Alberto Fert(1938–), **Peter Grünberg**(1939-2018)

ANTES
1856 El físico escocés William Thomson (Lord Kelvin) descubre la magnetorresistencia.

1928 El cuántico-
La idea mecánica del espín del electrón es postulada por los físicos holandeses-estadounidenses George Uhlenbeck y Samuel.
Dios mío.

1957 La primera unidad de disco duro (HDD) de una computadora tiene el tamaño de dos refrigeradores y puede almacenar 3,75 megabytes (MB) de datos.

DESPUÉS
1997físico británico
Stuart Parkin aplica
magnetorresistencia gigante para crear una tecnología de válvula giratoria extremadamente sensible para dispositivos de lectura de datos.

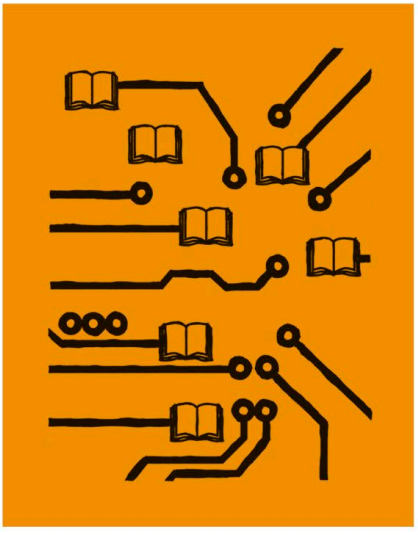
Las unidades de disco duro (HDD) de las computadoras almacenan datos codificados en bits, escritos en la superficie del disco como una serie de cambios en la dirección de la magnetización. Los datos se leen detectando estos cambios como una serie de 1 y 0. La presión para almacenar más datos en menos espacio ha impulsado una evolución constante en la tecnología HDD, pero pronto surgió un problema importante: era difícil para los sensores convencionales leer cantidades cada vez mayores de datos en un espacio de disco cada vez más pequeño.

En 1988, dos equipos de científicos informáticos, uno dirigido por Albert Fert y el otro por Peter Grünberg, descubrieron de forma independiente la magnetorresistencia gigante (GMR). GMR depende del espín del electrón, un propiedad mecánico-cuántica.

Los electrones poseen espín ascendente o descendente: si el espín de un electrón está "arriba", se moverá fácilmente a través de un circuito magnetizado orientado hacia arriba. material, pero encontrará mayor resistencia a través de un imán orientado hacia abajo. El estudio del espín de los electrones se conoció como "espintrónica". Intercalando un material no magnético entre capas magnéticas de sólo unos pocos átomos de espesor, y al aplicar pequeños campos magnéticos, la corriente que fluía a través de ellas se polarizaba por espín. El espín del electrón estaba orientado hacia "arriba" o "abajo", y si el campo magnético cambiaba, la corriente polarizada por espín se activaba o desactivaba, como una válvula. Esta válvula giratoria podría detectar impulsos magnéticos diminutos al leer datos del disco duro, lo que permitiría almacenar cantidades mucho mayores de datos.

> "Acabábamos de participar en el nacimiento del fenómeno. que llamamos gigante magnetorresistencia."
> **Alberto Fert**

Ver también: Magnetismo 122–123 · Nanoelectrónica 158 Números cuánticos 216–217 · Teoría cuántica de campos 224-225 Aplicaciones cuánticas 226–231



UNA ENCICLOPEDIA EN LA CABEZA DE UN PIN

NANOELECTRÓNICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Gordon Moore(1929–)

ANTES
Finales de la década de 1940 Se fabrican los primeros transistores. medición⅓pulgada de largo.

1958 El ingeniero eléctrico estadounidense Jack Kilby demuestra el primero circuito integrado de trabajo.

1959 Richard Feynman desafía a otros científicos a investigar la nanotecnología.

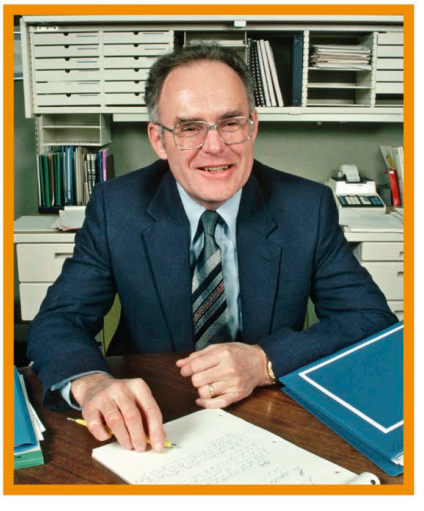
DESPUÉS
1988 Albert Fert y Peter Grünberg de forma independiente Descubra el efecto GM (magnetorresistencia gigante), que permite que los discos duros de las computadoras almacenen cantidades cada vez mayores de datos.

1999 El ingeniero electrónico estadounidense Chad Mirkin inventa la nanolitografía con pluma de inmersión, que "escribe" nanocircuitos en obleas de silicio.

Los componentes que son parte integral de prácticamente todos los dispositivos electrónicos, desde teléfonos inteligentes hasta sistemas de encendido de automóviles, miden solo unos pocos nanómetros (nm) en escala (1 nm es la milmillonésima parte de 1 metro). Un puñado de pequeños circuitos integrados (CI) pueden realizar funciones que antes realizaban miles de transistores, conmutando o amplificando señales electrónicas. Los circuitos integrados son conjuntos de componentes, como transistores y diodos, que se imprimen en una oblea de silicio, un material semiconductor.

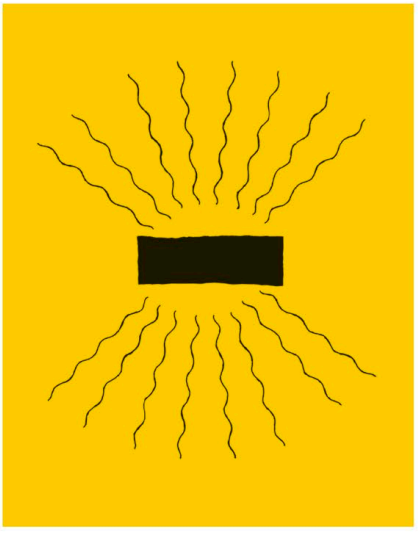
Reducir el tamaño, el peso y el consumo de energía de los dispositivos electrónicos ha sido una tendencia impulsora desde la década de 1950. En 1965, el ingeniero estadounidense Gordon Moore pronosticó la demanda de componentes electrónicos cada vez más pequeños y predijo que el número de transistores por chip de silicio se duplicaría cada 18 meses.

En 1975, revisó el cronograma para hacerlo cada dos años, máxima que se conoció como "ley de Moore". Aunque el ritmo de miniaturización se ha desacelerado desde 2012, los transistores modernos más pequeños tienen un diámetro de 7 nm, lo que permite integrar 20 mil millones de circuitos basados en transistores en un solo microchip de computadora. Para fabricar estos nanocircuitos se utiliza fotolitografía (transferir un patrón de una fotografía al material semiconductor).



Gordon Moore, que fue director general de la empresa tecnológica Intel entre 1975 y 1987, es más conocido por sus observaciones sobre la demanda de componentes electrónicos cada vez más pequeños.

Ver también: El efecto motor 136-137 · Electrónica 152–155 Almacenamiento de datos 157 · Aplicaciones cuánticas 226–231 Electrodinámica cuántica 260



UN SOLO POLO, O AL NORTE O SUR

MONOPOLES MAGNÉTICOS

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Gerard 't Hooft(1946–),
Alexander Poliakov(1945–)

ANTES
1865 James Clerk Maxwell unifica la electricidad y Magnetismo en una teoría.

1894 Pierre Curie sugiere que podrían existir monopolos magnéticos.

1931 Paul Dirac propone que los monopolos magnéticos podrían explicar la cuantificación de la carga eléctrica.

1974 Los físicos estadounidenses Sheldon Glashow y Howard Georgi publican la primera Gran Teoría Unificada (GUT) en partículas fisicas.

DESPUÉS
mil novecientos ochenta y dos Blas Cabrera, físico español de la Universidad de Stanford, California, registra un evento consistente con un monopolo pasando a través de un dispositivo superconductor.

En el magnetismo clásico, los imanes tienen dos polos que no se pueden separar. Si un imán se parte por la mitad, el extremo roto simplemente se convierte en un nuevo polo. Sin embargo, en física de partículas, los monopolos magnéticos son hipotéticos.
partículas con un solo polo, ya sea norte o sur. En teoría, los monopolos magnéticos opuestos se atraen, los monopolos iguales se repelen y sus trayectorias se curvan en un campo eléctrico.

No hay pruebas observacionales o experimentales de que existan monopolos magnéticos, pero en 1931, el físico británico Paul Dirac sugirió que podrían explicar la cuantificación de la carga eléctrica, mediante la cual todas las cargas de los electrones son múltiplos de 1,6 - 10.-19culombios.

La gravedad, el electromagnetismo, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte son las cuatro fuerzas fundamentales reconocidas. En física de partículas, varias variantes de la Gran Teoría Unificada (GUT) proponen que en un entorno de energía excepcionalmente alta,
electromagnético, débil y fuerte

> Los experimentadores continuarán para acechar el monopolo con determinación inquebrantable e ingenio.
>
> **John Preskill**
> **físico teórico estadounidense**

Las fuerzas nucleares se fusionan en una sola fuerza. En 1974, los físicos teóricos Gerard 't Hooft y Alexander Polyakov argumentaron de forma independiente que GUT predice la existencia de monopolos magnéticos.

En 1982, un detector de la Universidad de Stanford registró una partícula compatible con un monopolo, pero desde entonces nunca se han encontrado tales partículas, a pesar de los esfuerzos de los científicos por encontrarlas utilizando magnetómetros altamente sensibles.-

Ver también: Magnetismo 122–123 · Carga eléctrica 124–127 Campo cuántico teoría 224–225 · Aplicaciones cuánticas 226–231 Teoría de cuerdas 308–311

SONIDO
LUZ
las propiedades de olas

D

Pitágoras descubre el **vínculo entre la longitud** de cuerdas de lira y el **tono de sonido** ellos hacen.

SIGLO VI antes de Cristo

Euclides escribe *Óptica*, afirmando que **luz viaja en línea recta líneas** y describiendo el **ley de reflexión**.

SIGLO III CE

El astrónomo holandés Willebrord Snellius diseña una ley para la relación entre un **ángulo de un rayo de luz** entrando en un transparente material y su **ángulo de refracción**.

1621

Robert Hooke publica *micrografía*, la primera **estudio de minuto objetos** visto a través de los microscopios El diseñó.

1665

SIGLO IV antes de Cristo

Aristóteles sugiere correctamente que **el sonido es una onda** transmitido a través de **movimiento del aire** pero propone erróneamente que las altas frecuencias viajan más rápido que bajas frecuencias.

50 CE

Héroe de Alejandría muestra que el **ley de reflexión** se puede derivar utilizando únicamente la geometría adoptando la regla de que **luz** siempre viaja entre dos puntos por el **camino más corto**.

1658

Pierre de Fermat muestra que todas las leyes de **reflexión** y **refracción** puede describirse utilizando el principio de que **luz** siempre **viaja entre dos puntos** en el camino que lleva el **menos tiempo**.

h el oído y la vista son los sentidos que más utilizamos para interpretar el mundo; No es de extrañar que la luz (un requisito previo para la vista humana) y el sonido hayan fascinado a los humanos desde los albores de la civilización.

La música forma parte de la vida cotidiana desde el Neolítico, como lo atestiguan las pinturas rupestres y la arqueología. Los antiguos griegos, cuyo amor por el aprendizaje infundía cada elemento de su cultura, intentaron descubrir los principios detrás de la producción de sonidos armónicos. Pitágoras, inspirado por oír martillos golpear diferentes notas sobre un yunque, reconoció que existía una relación entre el sonido y el tamaño de la herramienta o instrumento que lo producía. En varios estudios, él y sus alumnos exploró los efectos de la vibración de cuerdas de lira de diferentes tensiones y longitudes.

Reflexión y refracción Los espejos y los reflejos también han sido durante mucho tiempo objetos maravillosos. También en la antigua Grecia, los eruditos demostraron, utilizando únicamente la geometría, que la luz siempre regresa de una superficie reflejada en el mismo ángulo con el que se acerca a ella, un principio conocido hoy como ley de la reflexión.

En el siglo X, el matemático persa Ibn Sahl observó la relación entre el ángulo de incidencia de un rayo de luz cuando entra en un material transparente y su ángulo de refracción dentro de ese material. En el siglo XVII, los franceses
El matemático Pierre de Fermat propuso correctamente que un único principio pertenecía a ambos reflexión y refracción: la luz siempre elige tomar el camino más corto posible entre dos puntos cualesquiera.

Los fenómenos de reflexión y refracción de la luz permitieron a pioneros como el físico y astrónomo italiano Galileo Galilei y Robert Hooke en Inglaterra crear dispositivos que ofrecían nuevas visiones del universo, mientras los microscopios develaban la naturaleza. Los telescopios revelaron lunas hasta ahora invisibles que orbitan alrededor de otros planetas y

impulsó una reevaluación del lugar de la Tierra en el cosmos, mientras que los microscopios ofrecían una visión de un mundo extraño de criaturas diminutas y la estructura celular de la vida misma.

La naturaleza misma de la luz fue cuestionada muchas veces por científicos influyentes a lo largo de los siglos. Algunos sintieron que la luz estaba compuesta

1669
El científico danés Rasmus Bartolino describe **polarización de la luz** después de observar la birrefringencia de cristales de calcita.

1675
isaac newton plantea la hipótesis de que **la luz se hace de partículas** llamados corpúsculos.

1690
El físico holandés Christiaan Huygens publica *Tratado en luz*, delineando su **teoria de las ondas** y cómo la luz se curva al pasar entre diferentes medios.

1800
Británico nacido en Alemania astrónomo guillermo Herschel descubre **radiación infrarroja**, la primera luz fuera del **electromagnético espectro**.

1803
Thomas Young experimento de división un rayo de sol demuestra la **propiedades de las olas de luz**.

1842
cristian doppler describe el cambio en el **color de estrellas** en relación con sus **movimiento**, un efecto demostrado posteriormente utilizando **ondas sonoras**.

1865
James Clerk Maxwell demuestra que **luz** es una oscilación de **magnético y campos eléctricos**.

1967
Irlandés norteño astrofísico Jocelyn Bell Burnell descubre **púlsares (estrellas pulsantes)** usando la radio astronomía.

de pequeñas partículas que se mueven a través del aire desde una fuente hasta un observador, posiblemente después de la reflexión de un objeto. Otros vieron la luz como una onda, citando comportamientos como la difracción (propagación de la luz al pasar a través de espacios estrechos). Los físicos ingleses Isaac Newton y Robert Hooke se opusieron; Newton favoreció las partículas y Hooke optó por las ondas.

El erudito y médico británico Thomas Young dio una respuesta. En un experimento presentado a la Royal Society en 1803, dividió un rayo de luz solar, dividiéndolo por medio de una tarjeta delgada, de modo que se difractara y produjera un patrón en una pantalla. El patrón no era el de dos manchas brillantes de dos rayos de luz, sino una serie de líneas repetidas brillantes y oscuras. Los resultados sólo podrían explicarse si La luz actuaba como una onda, y las ondas a cada lado de la delgada tarjeta interferían entre sí.

La teoría ondulatoria despegó, pero sólo cuando quedó claro que la luz viajaba en ondas transversales, a diferencia del sonido, que viaja en ondas longitudinales. Pronto, los físicos que examinaban las propiedades de la luz también notaron que las ondas de luz podían verse obligadas a oscilar en orientaciones particulares conocidas como polarización. En 1821, el físico francés Augustin-Jean Fresnel había elaborado una teoría completa de la luz en términos de ondas.

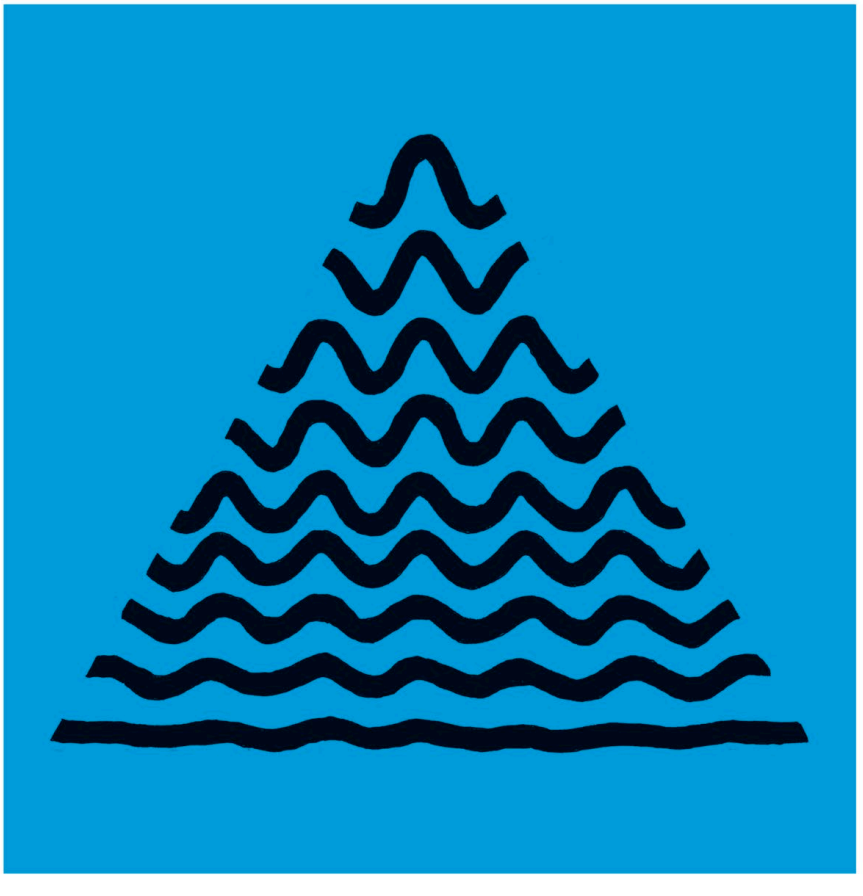
El efecto Doppler

Al examinar la luz de pares de estrellas que orbitan entre sí, el físico austriaco Christian Doppler observó que la mayoría de los pares mostraban una estrella roja y la otra azul. En 1842 propuso que esto se debía a su movimiento relativo a medida que uno se alejaba y el otro se acercaba a la Tierra. La teoría fue probada para el sonido y considerada correcta para la luz; El color de la luz depende de su longitud de onda, que es más corta cuando una estrella se acerca y más larga cuando se aleja.

En el siglo XIX, los físicos también descubrieron nueva luz invisible al ojo humano: primero la infrarroja y luego la ultravioleta. En 1865, el físico escocés James Clerk Maxwell interpretó la luz como una onda electromagnética, lo que generó preguntas sobre hasta dónde podría extenderse el espectro electromagnético. Pronto los físicos descubrieron la luz con frecuencias más extremas, como los rayos X, los rayos gamma, las ondas de radio y las microondas, y sus múltiples usos. La luz invisible para los humanos es ahora una parte esencial de la vida moderna.

HAY GEOMETRÍA EN EL tarareo DE LAS CUERDAS

MÚSICA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE

Pitágoras (C. 570–495 antes de Cristo)

ANTES

C. 40.000 antes de Cristo El instrumento musical más antiguo conocido construido expresamente es una flauta tallada en el hueso del ala de un buitre, encontrada en la cueva Hohle Fels cerca de Ulm, Alemania, en 2008.

DESPUÉS

C. 350 antes de Cristo Aristóteles sugiere que el sonido se transmite mediante el movimiento del aire.

1636 teólogo francés y el matemático Marin Mersenne descubre la ley que vincula la frecuencia fundamental de una cuerda estirada con su longitud, masa y tensión.

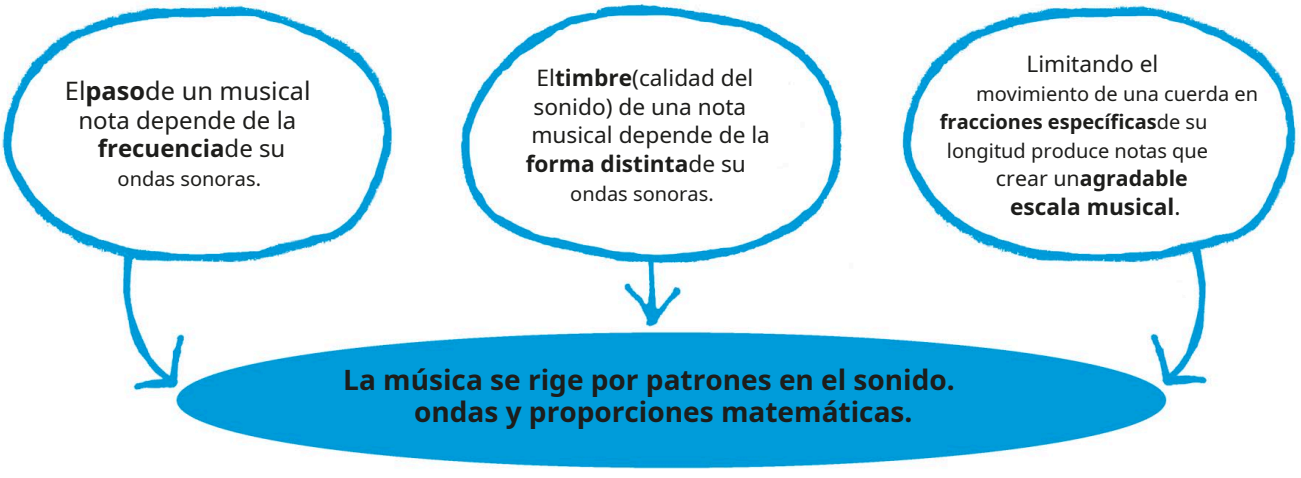
1638 En Italia, Galileo Galilei afirma que el tono depende de la frecuencia, más que de la velocidad, de las ondas sonoras.

Los humanos han estado haciendo música desde tiempos prehistóricos, pero no fue hasta la edad de oro de la antigua Grecia (500-300 antes de Cristo) que se establecieron algunos de los principios físicos detrás de la producción de sonidos armónicos, en particular la frecuencia y el tono. El primer intento científico de comprender estos aspectos fundamentales de la música se atribuye generalmente al filósofo griego Pitágoras.

El sonido de la musica

El tono está determinado por la frecuencia de las ondas sonoras (el número de ondas que pasan por un punto fijo cada segundo). Una combinación

Ver también: El método científico 20-23 · El lenguaje de la física 24–31 Presión 36 · Movimiento armónico 52–53 · Ondas electromagnéticas 192-195 Piezoelectricidad y ultrasonido 200–201. · Los cielos 270–271



de la física y la biología posibilita su percepción por el oído humano. Hoy en día sabemos que las ondas sonoras son longitudinales: se crean cuando el aire se desplaza hacia adelante y hacia atrás en direcciones paralelas a aquella en la que se propaga la onda (moviéndose a través del medio que la transporta). Percibimos el sonido cuando estas oscilaciones hacen que nuestros tímpanos vibren.

Si bien la frecuencia o el tono de un sonido dicta la nota que escuchamos, la música también tiene otra cualidad conocida como "timbre". Esta es la variación sutil en la subida y bajada de las ondas producida por un instrumento musical particular, características de la “forma” de la onda que son distintas de su simple frecuencia y longitud de onda (la distancia entre dos picos y valles sucesivos en una onda).
Ningún instrumento musical no digital puede producir ondas sonoras que varíen de manera consistente y completamente suave, y el timbre es la razón por la cual una nota cantada por una voz humana puede sonar muy diferente cuando se toca en un instrumento de cuerda, viento o metal.

o incluso cantada por otro cantante. Los músicos también pueden alterar el timbre de un instrumento utilizando diferentes técnicas de ejecución. Un violinista, por ejemplo, puede cambiar la forma en que vibran las cuerdas usando el arco de diferentes maneras.

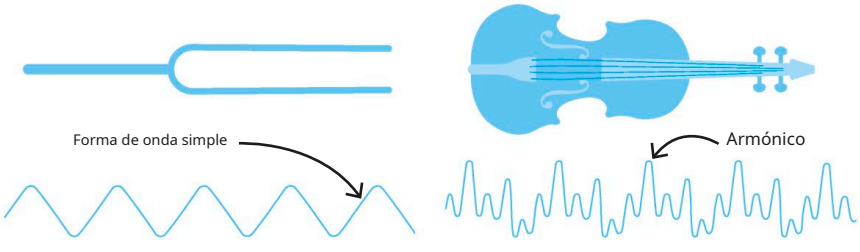
Hallazgos pitagóricos

Según la leyenda, Pitágoras formuló sus ideas sobre el tono mientras escuchaba el sonido melódico de los martillos golpeando los yunques al pasar por el ajetreado taller de un herrero. Al escuchar una nota que sonaba diferente a las demás, se dice que entró corriendo.

Probó los martillos y yunques y, al hacerlo, descubrió una relación entre el tamaño del martillo utilizado y el tono del sonido que producía.

Como muchas otras historias sobre Pitágoras, este episodio es ciertamente inventado (no existe relación entre el tono y el tamaño del martillo que golpea un yunque), pero lo cierto es que el filósofo y sus seguidores encontraron vínculos fundamentales entre la física de los instrumentos musicales y la notas que produjeron. Se dieron cuenta de que había una relación entre el tamaño y

Incluso si dos notas tienen el mismo tono, su sonido depende de la forma de sus ondas. Un diapasón produce un sonido puro con un solo tono. Un violín tiene una forma de onda irregular con tonos llamados armónicos además de su tono fundamental.



> La armonía... depende de la proporción musical; no es más que un misterio relación musical.
>
> **Florian Cajori**
>
> **matemático suizo-estadounidense**

sonido de instrumentos musicales. En particular, encontraron relaciones similares entre los sonidos producidos por cuerdas de diferentes longitudes, tubos de órgano de diferentes alturas e instrumentos de viento de diferentes diámetros y longitudes.

Los descubrimientos de los pitagóricos tuvieron más que ver con experimentos sistemáticos con cuerdas vibrantes que con martillos y yunques. La observación de que las cuerdas más cortas vibran más rápidamente y producen notas más altas no era nada nuevo: había sido la base de los instrumentos de cuerda durante al menos 2.000 años. Sin embargo, hacer vibrar cuerdas idénticas de diferentes maneras produjo resultados más interesantes.

Pitágoras y sus alumnos probaron cuerdas de liras (uno de los primeros instrumentos musicales) con diferentes longitudes y tensiones. Pulsar una cuerda en la mitad de su longitud, por ejemplo, crea una "onda estacionaria" en la que el medio oscila hacia adelante y hacia atrás mientras los extremos permanecen fijos en su lugar. En efecto, la cuerda produce una onda con una longitud de onda que es el doble de su propia longitud y una frecuencia determinada por la longitud de onda y la tensión en la cuerda. Esto se conoce como tono fundamental o "primer armónico". Se pueden crear ondas estacionarias de longitudes de onda más cortas, conocidas como "armónicos superiores", "deteniendo" una cuerda (manteniendo o limitando su movimiento en otro punto de su longitud). El "segundo armónico" se produce deteniendo la cuerda exactamente en la mitad de su longitud. Esto da como resultado una onda cuya longitud de onda total coincide con la longitud de la cuerda; en otras palabras,
Es decir, la longitud de onda es la mitad y la frecuencia el doble que la del tono fundamental. Para el oído humano, esto crea una nota con muchas de las mismas características que el tono fundamental pero con un tono más alto; en términos musicales, es una octava más alta. Una parada en un tercio del recorrido de la cuerda crea el tercer armónico, con una longitud de onda de dos tercios de la longitud de la cuerda y una frecuencia tres veces mayor que la del tono fundamental.

El quinto perfecto

La diferencia entre el segundo y tercer armónico era importante. Equivalente a una proporción de 3:2 entre las frecuencias de las ondas vibratorias, separaba tonos (notas musicales) que se mezclaban agradablemente, pero que también eran musicalmente más distintos entre sí que las notas armónicas separadas por una octava entera.

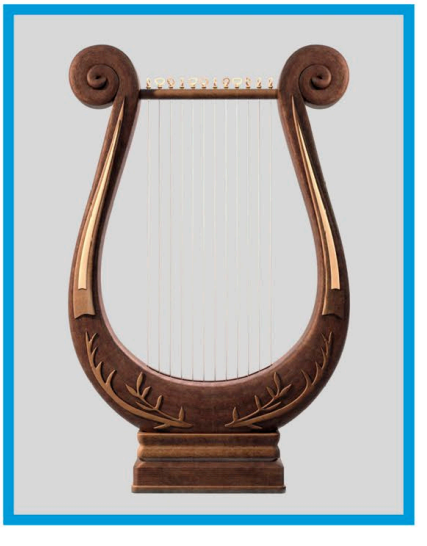
La experimentación pronto permitió a los pitagóricos construir todo un sistema musical en torno a esta relación. Al construir y "afinar" correctamente otras cuerdas para que vibren en frecuencias establecidas por relaciones numéricas simples, construyeron un puente musical, o progresión, entre las cuerdas.

La lira de la antigua Grecia
Originalmente tenía cuatro cuerdas, pero había adquirido hasta 12 en el siglo V.antes de Cristo. Los músicos pulsaban las cuerdas con una púa.

tono fundamental y la octava a través de una serie de siete pasos sin notas discordantes llamativas. La proporción 3:2 definió el quinto de estos pasos y se conoció como el "quinto perfecto".

Sin embargo, un conjunto de siete notas musicales (equivalentes a las teclas blancas, designadas A-G, de una octava en un piano moderno) resultó algo limitante, y más tarde se introdujeron divisiones de afinación más pequeñas llamadas semitonos. Esto condujo a un sistema versátil de doce notas (las teclas blancas y negras de un piano moderno). Mientras que las siete teclas blancas por sí solas sólo pueden hacer una progresión agradable (conocida como "escala diatónica") cuando se tocan en orden hacia arriba o hacia abajo de una "C" a la siguiente, las teclas negras adicionales ("sostenidos" y "bemoles") permitir que dicha progresión se siga desde cualquier punto.

La "afinación pitagórica" basada en la quinta justa se utilizó para encontrar el tono deseable de las notas en los instrumentos musicales occidentales durante muchos siglos, hasta que los cambios en el gusto musical en la era del Renacimiento llevaron a afinaciones más complejas. Las culturas musicales fuera de Europa, como las de India y China,



Un grabado en madera medieval Representa las investigaciones musicales de Pitágoras y su seguidor Filolao, incluidos los diversos sonidos producidos por instrumentos de viento de diferentes tamaños.

Siguieron sus propias tradiciones, aunque ellos también reconocieron los efectos agradables cuando las notas de ciertos tonos se tocaban en secuencia o juntas.

¿Música de las esferas?

Para los filósofos pitagóricos, la comprensión de que la música estaba moldeada por las matemáticas reveló una verdad profunda sobre el universo en su conjunto. Les inspiró a buscar patrones matemáticos en otros lugares, incluso en los cielos. Los estudios de los patrones cíclicos en los que los planetas y las estrellas se movían por el cielo condujeron a una teoría de la armonía cósmica que más tarde se conoció como la "música de las esferas".

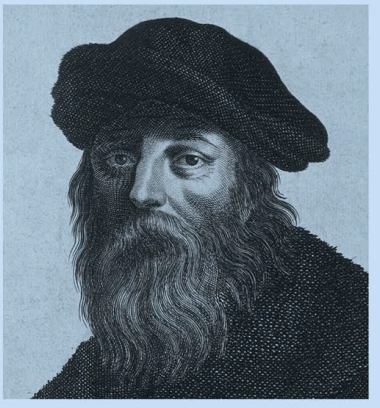
Varios seguidores de Pitágoras también intentaron explicar la naturaleza de las notas musicales considerando la física involucrada. El filósofo griego Arquitas (c. 428-347)antes de Cristo) sugirieron que las cuerdas oscilantes creaban sonidos que se movían a diferentes velocidades, que los humanos escuchaban como tonos diferentes. Aunque incorrecta, esta teoría fue adoptada y repetida en las enseñanzas de los enormemente influyentes filósofos Platón.

y Aristóteles y pasó al canon de la teoría musical occidental prerrenacentista.

Otro malentendido musical de larga data transmitido por los pitagóricos fue su afirmación de que el tono de una cuerda tenía una relación proporcional tanto con su longitud como con la tensión a la que estaba encordada. Cuando el laudista y teórico musical italiano Vincenzo Galilei (padre de Galileo) investigó estas supuestas leyes a mediados del siglo XVI, descubrió que si bien la supuesta relación entre longitud y tono era correcta, la ley de la tensión era más compleja: el tono varió en proporción a la raíz cuadrada de la tensión aplicada.

El descubrimiento de Galilei generó preguntas más amplias sobre la supuesta superioridad del conocimiento griego antiguo, mientras que su método experimental (realizar pruebas prácticas y análisis matemáticos en lugar de dar por sentadas las afirmaciones de la autoridad) se convirtió en una gran influencia para su hijo.

> Vieron en números el atributos y proporciones de las escalas musicales.
>
> **Aristóteles**
> **sobre los pitagóricos**

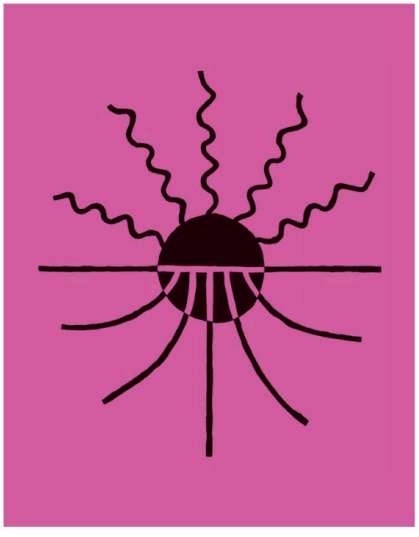


Pitágoras

Poco se sabe sobre la vida temprana de Pitágoras, pero los historiadores griegos posteriores coincidieron en que nació en la isla egea de Samos, una importante centro comercial, en alrededor de 570antes de Cristo. Algunas leyendas hablan de viajes de juventud por el Cercano Oriente y de estudios con sacerdotes y filósofos egipcios o persas, así como con eruditos griegos. Dicen también que al regresar a Samos ascendió rápidamente en la vida pública.

Alrededor de los 40 años, Pitágoras se mudó a Crotona, una ciudad griega en el sur de Italia, donde fundó una escuela de filosofía que atrajo a muchos seguidores. Los escritos supervivientes de los alumnos de Pitágoras sugieren que su enseñanzas incluidas no sólo matemáticas y música, pero también ética, política, metafísica (investigación filosófica sobre la naturaleza de la realidad misma) y misticismo.

Pitágoras adquirió una gran influencia política sobre los líderes de Crotona y es posible que haya muerto durante un levantamiento civil desencadenado por su rechazo a los llamamientos a favor de una constitución democrática. Su muerte se sitúa en torno al 495antes de Cristo.



LA LUZ SIGUE EL CAMINO DE MENOS TIEMPO

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Pierre de Fermat(1607-1665)

ANTES
C. 160CE Ptolomeo propone la teoría de que el ojo emite rayos que devuelven información al observador.

C. 990 El matemático persa Ibn Sahl desarrolla una ley de refracción después de estudiar la curvatura de la luz.

1010 El erudito árabe Ibn al-Haytham*Libro de Óptica* propone que la visión es el resultado de los rayos que entran al ojo.

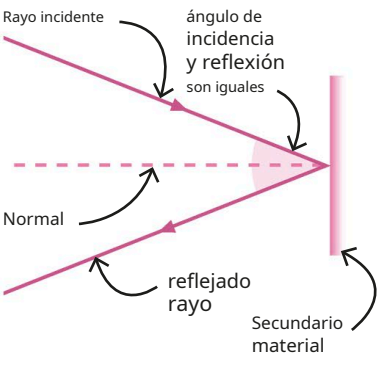
DESPUÉS
1807 Thomas Young acuña el término "índice de refracción" para describir la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en un material refractante.

1821 El francés Augustin Fresnel esboza una teoría completa de la luz y describe la refracción y la reflexión en términos de ondas.

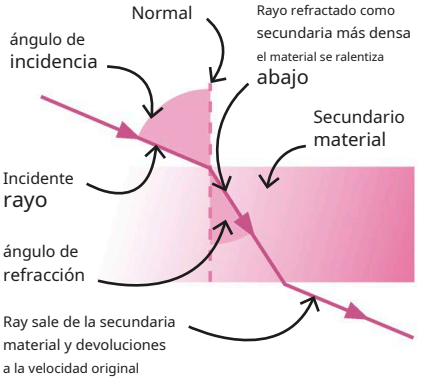
La reflexión y la refracción son los dos comportamientos fundamentales de la luz. La reflexión es la tendencia de la luz a rebotar en una superficie en una dirección relacionada con el ángulo con el que se acerca a esa superficie. Los primeros estudios llevaron al matemático griego Euclides a observar que la luz se refleja en un espejo en un "ángulo de reflexión" igual a su "ángulo de incidencia", el ángulo al que se aproxima en relación con una línea perpendicular a la superficie del espejo.

La refracción es la forma en que los rayos de luz cambian de dirección al pasar de un material transparente a otro.

Luz acercándose al límitea otro material puede reflejarse en el mismo ángulo con respecto a la línea "normal", perpendicular a la superficie, o refractarse en un ángulo que se relaciona con el ángulo de aproximación y la velocidad relativa de la luz en los dos materiales. Ya sea que la luz se refleje o se refracte, siempre sigue el camino más corto y sencillo.



Reflexión



Refracción

Ver también: Energía y movimiento 56–57 · Luz de enfoque 170–175 Luz grumosa y ondulada 176–179 · Difracción y interferencia 180–183 · Polarización 184–187 La velocidad de la luz 275 · Materia oscura 302–305

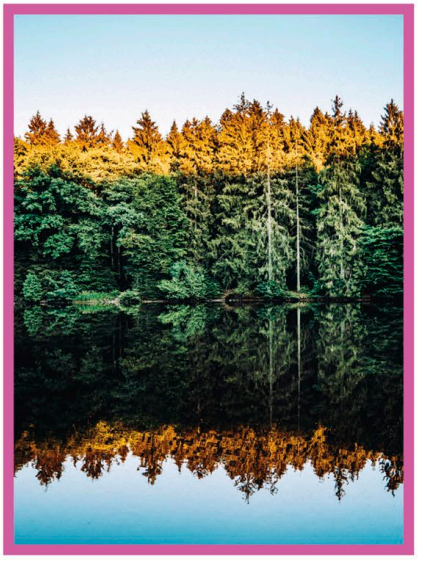
otro. Fue el matemático persa del siglo X Ibn Sahl quien encontró por primera vez una ley que vincula el ángulo de incidencia de un rayo en el límite de dos materiales con su ángulo de refracción en el segundo material, así como las propiedades de los dos materiales. Esto fue redescubierto en Europa a principios del siglo XVII, sobre todo por el astrónomo holandés Willebrord Snellius, y se conoce como ley de Snell.

Camino y tiempo más cortos.

En 1658, el matemático francés Pierre de Fermat se dio cuenta de que tanto la reflexión como la refracción podían describirse utilizando el mismo principio básico, una extensión del propuesto por Héroe de Alejandría. El principio de Fermat establece que el camino que seguirá la luz entre dos puntos cualesquiera es aquel que se puede cruzar en el menor tiempo.

Fermat creó su principio considerando el concepto anterior del físico holandés Christiaan Huygens que describía el movimiento de la luz en forma de ondas y cómo se aplicaba a casos con la longitud de onda más pequeña imaginable. Esto a menudo se considera una justificación del concepto de "rayo" de luz: la idea ampliamente utilizada de un haz de luz que viaja a través del espacio siguiendo la trayectoria del menor tiempo. Cuando la luz se mueve a través de un único medio inmutable, esto significa que viajará en línea recta (excepto cuando el espacio por el que viaja esté distorsionado). Sin embargo, cuando la luz se refleja desde un límite o pasa a un medio transparente en el que su velocidad es más lenta o más rápida, este "principio de tiempo mínimo" dicta el camino que tomará.

Al suponer que la velocidad de la luz era finita y que la luz se movía más lentamente en materiales transparentes más densos, Fermat pudo derivar la ley de Snell a partir de su principio, describiendo correctamente cómo la luz se curvará hacia la normal.



Un paisaje se refleja en un lago en un día tranquilo. El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia: el ángulo en el que la luz del sol reflejada en el paisaje incide en el agua.

al entrar en un material más denso, y alejándose de él al entrar en uno menos denso.

El descubrimiento de Fermat fue importante por derecho propio, pero también ampliamente considerado como el primer ejemplo de lo que se conoce como una familia de "principios variacionales" en física, que describen la tendencia de los procesos a seguir siempre el camino más eficiente.

Pierre de Fermat

Nacido en 1607, hijo de un comerciante del suroeste de Francia, Pierre de Fermat se formó y trabajó como abogado, pero se dedica principalmente recordado por las matemáticas. Encontró una manera de calcular las pendientes y los puntos de inflexión de las curvas una generación antes de que Isaac Newton y Gottfried Leibniz usaran el cálculo para hacerlo.

El "principio de tiempo mínimo" de Fermat se considera un paso clave hacia el "principio de acción mínima" más universal: una observación de que muchos fenómenos físicos se comportan de manera que minimizan (o a veces maximizan) la energía requerida. Esto fue importante para comprender no sólo la luz y el movimiento a gran escala, sino también el comportamiento de los átomos a nivel cuántico. Fermat murió en 1665; tres siglos después, en 1995 se demostró finalmente su famoso último teorema de Fermat sobre el comportamiento de los números a potencias superiores a 2.

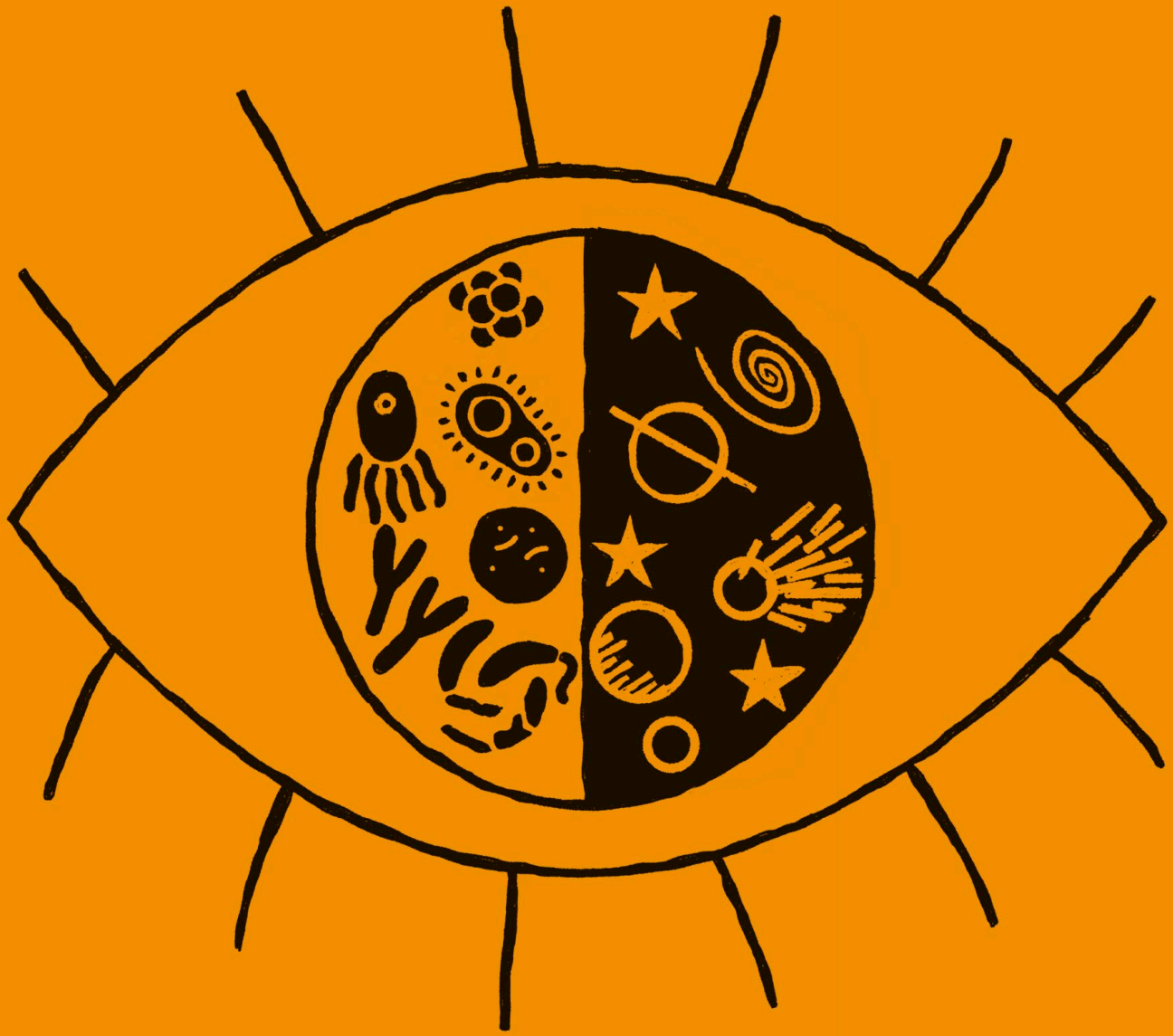
Obra clave

1636 "Método para encontrar máximos, mínimos y tangentes lineales de curvas"

UNA NUEVA VISIBLE

MUNDO

LUZ DE ENFOQUE



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Antonie van Leeuwenhoek
(1632-1723)

ANTES

siglo quinto antes de Cristo En la antigua Grecia, se utilizaban discos convexos de cristal o vidrio para encender fuegos enfocando la luz solar en un solo punto.

C. 1000 CE Las primeras lentes, "piedras de lectura" de vidrio con base plana y superficie superior convexa, se utilizan en Europa.

DESPUÉS

1893 El científico alemán August Köhler diseña un sistema de iluminación para el microscopio.

1931 En Alemania, Ernst Ruska y Max Knoll construyen el primer microscopio electrónico que utiliza las propiedades cuánticas de los electrones para observar objetos.

1979 Se construye el Telescopio de Espejos Múltiples en Mount Hopkins, Arizona.

> donde el telescopio termina, el microscopio comienza. cual de los dos tienen el vista más grandiosa?
>
> **Victor Hugo**
> ***Los Miserables***

Así como los rayos de luz pueden reflejarse en diferentes direcciones mediante espejos planos (con una superficie plana), o refractarse de un ángulo a otro cuando cruzan un límite plano entre diferentes materiales transparentes, las superficies curvas se pueden usar para doblar los rayos de luz sobre caminos convergentes, juntándolos en un punto llamado foco. La curvatura y el enfoque de los rayos de luz mediante lentes o espejos es la clave de muchos instrumentos ópticos, incluido el innovador microscopio de lente única diseñado por Antonie van Leeuwenhoek en la década de 1670.

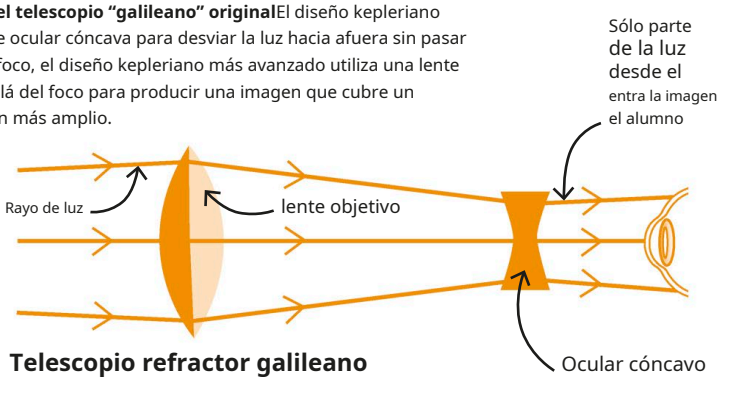
Principios de aumento

La primera forma de instrumento óptico fue la lente, utilizada en Europa a partir del siglo XI. El proceso de refracción cuando la luz entra y sale de una lente convexa (con una superficie curvada hacia afuera) dobla la
difundir los rayos de luz desde una fuente hacia caminos más paralelos, creando una imagen que ocupa una mayor parte del campo de visión del ojo. Estas lentes de aumento, sin embargo, tenían limitaciones. Estudiar objetos que estaban muy cerca de la lente, usando lentes más grandes para lograr un mayor campo de visión (área del objeto que podría ampliarse) implicaba doblar los rayos de luz que divergirían fuertemente entre los lados opuestos de la lente. Esto requería una lente más potente (muy curvada y más gruesa en el centro), que debido a las limitaciones de la fabricación temprana de vidrio era más probable que produjera distorsiones. Por tanto, parecía imposible conseguir grandes aumentos. Estos problemas retrasaron el desarrollo de instrumentos ópticos durante siglos.

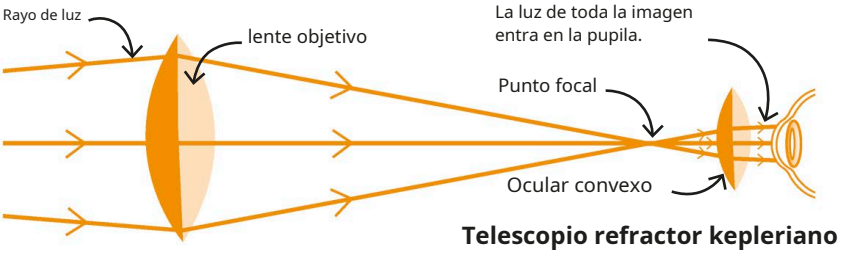
Los primeros telescopios

En el siglo XVII, los científicos se dieron cuenta de que utilizando una combinación de múltiples lentes en lugar de una sola lente en un instrumento se podía mejorar significativamente el aumento.

Mientras que el telescopio "galileano" original El diseño kepleriano utiliza una lente ocular cóncava para desviar la luz hacia afuera sin pasar a través de un foco, el diseño kepleriano más avanzado utiliza una lente convexa más allá del foco para producir una imagen que cubre un campo de visión más amplio.

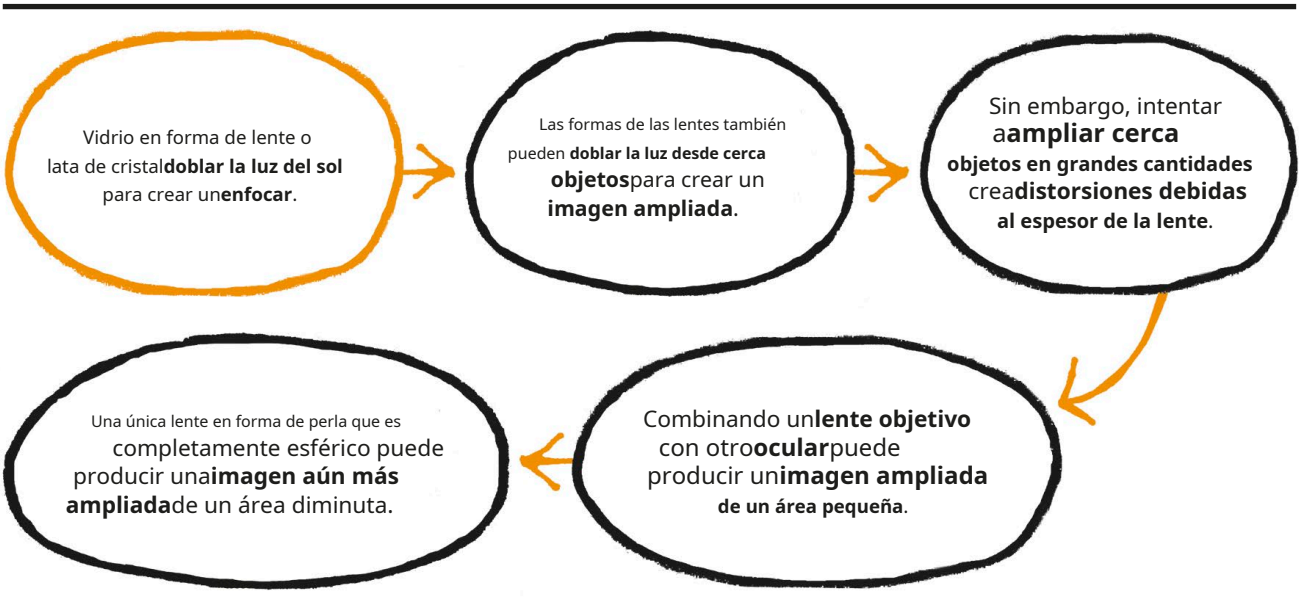


Telescopio refractor galileano



Telescopio refractor kepleriano

Ver también: Reflexión y refracción 168–169 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Difracción e interferencia 180–183 · Polarización 184–187 · Ver más allá de la luz 202–203



creando herramientas ópticas que podrían magnificar no solo los objetos cercanos sino también los muy lejanos.

El primer instrumento óptico compuesto (que utilizaba múltiples lentes) fue el telescopio, del que generalmente se dice que fue inventado por el fabricante de lentes holandés Hans Lippershey alrededor de 1608. El dispositivo de Lippershey, que constaba de dos lentes montadas en cada extremo de un tubo, producía imágenes de objetos distantes. objetos magnificados por un factor de tres. Así como una lupa desvía los rayos divergentes de los objetos cercanos hacia trayectorias más paralelas, lo mismo ocurre con el frente u "objetivo". La lente de un telescopio recoge rayos casi paralelos de objetos más distantes y los desvía hacia una trayectoria convergente. Sin embargo, antes de que los rayos puedan encontrarse, una cóncava

La lente "ocular" (curvada hacia adentro) los dobla hacia caminos divergentes, creando una imagen en el ojo del observador que parece más grande y (debido a que la lente del objetivo recogió mucha más luz que una pupila humana) también más brillante.

En 1609, el físico italiano Galileo Galilei construyó su propio telescopio basándose en este modelo. Su enfoque riguroso le permitió mejorar el original, produciendo dispositivos que podían aumentar en un factor de 30. Estos telescopios le permitieron hacer importantes descubrimientos astronómicos, pero las imágenes aún eran borrosas y el campo de visión pequeño.

> [El efecto de mi instrumento es tal que hace que un objeto sea cincuenta millas de distancia aparecen tan grandes como si estuviera a sólo cinco millas de distancia.
>
> **Galileo Galilei**

En 1611, el astrónomo alemán Johannes Kepler ideó un diseño mejor. En el telescopio Kepleriano, los rayos pueden encontrarse y la lente del ocular es convexa en lugar de cóncava. Aquí, la lente se coloca más allá del punto de enfoque, a una distancia donde los rayos han comenzado a divergir nuevamente.

Por lo tanto, el ocular actúa más como una lupa normal, creando una imagen con un campo de visión más amplio y ofreciendo potencialmente un aumento mucho mayor. Los telescopios Keplerianos forman imágenes al revés y al revés, pero esto no supuso un problema importante para las observaciones astronómicas, ni siquiera para los usuarios terrestres experimentados.

Abordar la aberración

La clave para aumentar el poder de aumento de un telescopio residía en la fuerza y separación de sus lentes, pero lentes más fuertes traían consigo sus propios problemas. Los astrónomos identificaron dos problemas principales: el colorido–

Diez veces más potente Además del Telescopio Espacial Hubble, el Telescopio Gigante de Magallanes en Chile, cuya finalización está prevista para 2025, captará luz de los confines del universo.

franjas alrededor de objetos conocidas como "aberración cromática" (causada por diferentes colores de luz que se refractan en diferentes ángulos) e imágenes borrosas debido a la "aberración esférica" (dificultades para fabricar una lente de curvatura ideal).

Parecía que la única ruta práctica para lograr un gran aumento con una aberración mínima era hacer que la lente del objetivo fuera más grande y más delgada, y colocarla mucho más lejos del ocular. A finales del siglo XVII, esto llevó a la construcción de extraordinarios "telescopios aéreos" que enfocaban la luz a distancias de más de 100 metros (330 pies).

Una solución más práctica fue descubierta por el abogado británico Chester Moore Hall alrededor de 1730. Se dio cuenta de que anidar una lente objetiva hecha de vidrio débilmente refractivo junto a una segunda lente cóncava con una refracción mucho más fuerte crearía un "doblete" que enfocaría todos los colores a una misma distancia. distancia única, evitando franjas borrosas. Esta lente "acromática" se generalizó después de que el óptico John Dollond descubriera y comercializara la técnica de Hall en la década de 1750. Desarrollos posteriores de la La misma idea permitió a los fabricantes de telescopios eliminar también la aberración esférica.

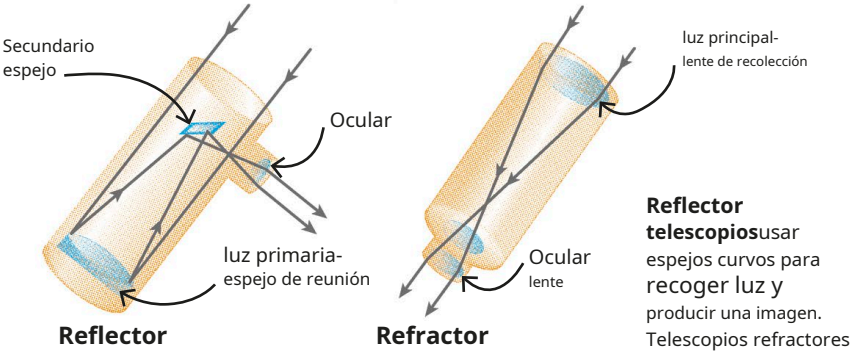
Telescopios espejados

A partir de la década de 1660, los astrónomos empezaron a utilizar telescopios reflectores. Estos utilizan un espejo primario curvo y cóncavo para recoger rayos de luz paralelos y rebotarlos en caminos convergentes. Se propusieron varios diseños a principios del siglo XVII, pero el primer ejemplo práctico fue construido por Isaac Newton en 1668. Utilizaba una lente primaria curvada esféricamente, con un pequeño espejo secundario suspendido en un ángulo diagonal frente a ella, que interceptó los rayos convergentes y los envió hacia un ocular en el costado del tubo del telescopio (cruzándose en un punto de enfoque a lo largo del camino).

El uso de la reflexión en lugar de la refracción evitó el problema de la aberración cromática, pero los primeros reflectores estaban lejos de ser perfectos. El "espéculo metálico" (una aleación de cobre y estaño muy pulido), utilizado para los espejos de la época, producía imágenes tenues teñidas de colores cobrizos. El vidrio recubierto de plata, un mejor reflector, fue iniciado por el físico francés Léon Foucault en la década de 1850.

microscopios compuestos

Así como los científicos combinaron lentes para magnificar objetos distantes, hicieron lo mismo para mejorar el poder de la lupa para mirar objetos minúsculos que estaban cerca. El crédito por inventar el "microscopio compuesto" es discutido, pero el inventor holandés Cornelis Drebbel demostró tal instrumento en Londres en 1621. Para minimizar el grosor y reducir la aberración,



Reflector telescopio

Refractor telescopio

Reflector telescopiosusar espejos curvos para recoger luz y producir una imagen. Telescopios refractores Utilice sólo lentes.

> Mi método para ver lo mismo animálculos más pequeños y anguilas diminutas, no les comunico otros; ni cómo ver muchos animálculos a la vez.
>
> **antonie van Leeuwenhoek**

La lente del objetivo de un microscopio compuesto tiene un diámetro muy pequeño (por lo que los rayos de luz que pasan por diferentes puntos de la lente son sólo ligeramente divergentes). La lente del ocular, que suele ser más grande que el objetivo, realiza la mayor parte del trabajo de producir la imagen ampliada.

El primer microscopio compuesto de mayor éxito fue diseñado por Robert Hooke en la década de 1660. Montó una tercera lente convexa entre la lente del objetivo y el ocular, desviando la luz más bruscamente y aumentando el aumento, a costa de una mayor aberración. También abordó otra cuestión importante: el pequeño campo de visión en el que se enfocaba el microscopio significaba que las imágenes tendían a ser oscuras (simplemente porque hay menos rayos de luz reflejados en un área más pequeña).
Para corregir esto, añadió una fuente de iluminación artificial: una vela cuya luz se enfocaba sobre el objeto mediante una bombilla esférica de vidrio llena de agua.

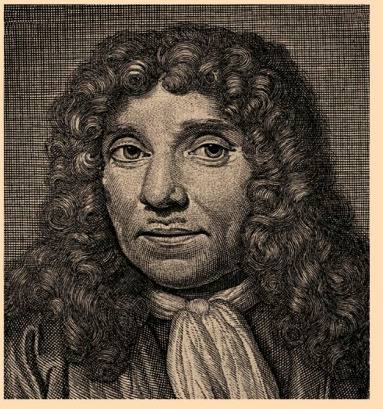
Los dibujos de gran formato de Hooke sobre estructuras de plantas e insectos, creados con el microscopio y publicados en la influyente revista libro de 1665 *micrografía*, causó sensación, pero su trabajo pronto fue superado por el del científico holandés Antonie van Leeuwenhoek.

Ingenio simple

El microscopio de lente única de Van Leeuwenhoek era mucho más potente que los microscopios compuestos de la época. La lente en sí era una pequeña cuenta de vidrio, una esfera pulida capaz de desviar los rayos de luz de un área pequeña de manera muy nítida para crear una imagen muy ampliada. Se colocó un marco de metal cerca del ojo que sujetaba la pequeña lente para que el cielo actuara como fuente de luz detrás de él. Un pasador en el marco mantenía la muestra en su lugar, y tres tornillos podían mover el pasador en tres dimensiones, permitiendo ajustes en el enfoque y el área sobre la que incidía la luz enfocada por la lente.

Van Leeuwenhoek mantuvo en secreto su técnica de fabricación de lentes, pero logró un aumento de al menos 270 veces, revelando características mucho más pequeñas de las que Hooke había visto. Con esta poderosa herramienta pudo descubrir las primeras bacterias, los espermatozoides humanos, y la estructura interna de las "células" ya identificadas por Hooke, por lo que es conocido como el padre fundador de la microbiología.

Van Leeuwenhoek hizo él mismo sus microscopios. Consistían en una pequeña lente esférica sujeta entre dos placas con un agujero en cada lado y un pasador para sujetar la muestra.



antonie van Leeuwenhoek

Nacido en la ciudad holandesa de Delft en 1632, van Leeuwenhoek se convirtió en aprendiz en una tienda de ropa a la edad de seis años. Al casarse en 1654, montó su propio negocio de pañería. Deseando estudiar de cerca la calidad de las fibras, pero descontento con el poder de las lupas disponibles, Estudió óptica y comenzó a fabricar sus propios microscopios.

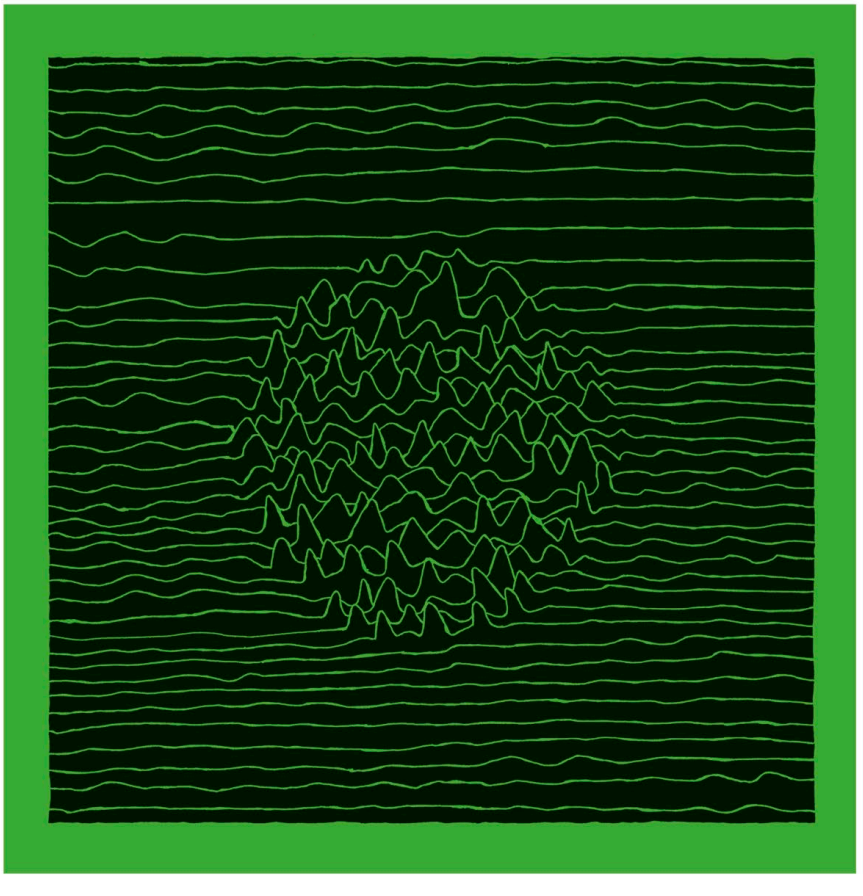
Van Leeuwenhoek pronto Comenzó a utilizar sus microscopios para estudios científicos y un médico amigo, Regnier de Graaf, llamó la atención de la Royal Society de Londres sobre su trabajo. Los estudios de Van Leeuwenhoek sobre el mundo microscópico, incluido su descubrimiento de organismos unicelulares, sorprendieron a sus miembros. Elegido miembro de la Royal Society en 1680, recibió la visita de los principales científicos de la época hasta su muerte en 1723.

Trabajos clave

375 letras en *Transacciones filosóficas de la Royal Society*
27 letras en *Memorias de la Academia de Ciencias de París*

LA LUZ ES UNA OLA

LUZ GRUMOSA Y ONDULADA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Tomás joven(1773–1829)

ANTES
siglo quinto **antes de Cristo** El filósofo griego Empédocles Afirma que del ojo humano surgen “corpúsculos de luz” para iluminar el mundo que lo rodea.

C. 60 **antes de Cristo** Lucrecio, filósofo romano, propone que la luz es una forma de partícula emitida por objetos luminosos.

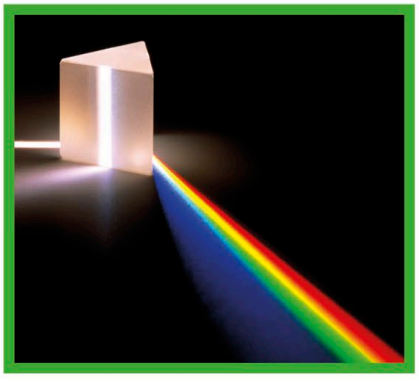
c.1020 En su *Libro de Óptica*, el erudito árabe Ibn al-Haytham teoriza que los objetos se iluminan por el reflejo de la luz del sol.

DESPUÉS
1969 En los Laboratorios Bell, en Estados Unidos, Willard Boyle y George E. Smith inventan el dispositivo de carga acoplada (CCD), que genera imágenes digitales mediante la recolección de fotones.

Las teorías sobre la naturaleza de la luz habían ocupado las mentes de filósofos y científicos desde la antigüedad, pero fue el desarrollo de instrumentos ópticos como el telescopio y el microscopio en el siglo XVII lo que condujo a avances importantes, como la confirmación de que la Tierra no era el centro. del sistema solar y el descubrimiento de un mundo microscópico.

Alrededor de 1630, el científico y filósofo francés René Descartes, tratando de explicar el fenómeno de la refracción de la luz (cómo se curva la luz cuando pasa entre medios), propuso que la luz era una perturbación viajera: una onda que se movía a

Ver también: Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142-147 · Difracción e interferencia 180–183 · Polarización 184–187 · Ondas electromagnéticas 192-195 · Cuantos de energía 208–211 · Partículas y ondas 212–215



La luz blanca se divide en los componentes del arco iris del espectro visible cuando pasa a través de un prisma. El color preciso depende de la longitud de la onda; el rojo tiene la más larga.

velocidad infinita a través de un medio que llenaba el espacio vacío. (Llamó a este medio pleno.) Alrededor de 1665, el científico inglés Robert Hooke fue el primero en establecer un vínculo entre la difracción de la luz (su capacidad de extenderse después de pasar a través de aberturas estrechas) y el comportamiento similar de las ondas del agua. Esto lo llevó a sugerir que la luz no sólo era una onda, sino que era una onda transversal, como el agua, una en la que la dirección de la perturbación forma ángulos rectos con la dirección del movimiento, o "propagación".

El espectro de colores

Las ideas de Hooke fueron pasadas por alto en gran medida gracias a la influencia dentro de la comunidad científica de su gran rival, Isaac Newton.

Alrededor de 1670, Newton inició una serie de experimentos sobre la luz y la óptica en los que demostró que el color es una propiedad intrínseca de la luz. Hasta entonces, la mayoría de los investigadores habían asumido que la luz adquiría colores a través de su interacción con diferentes materias, pero la teoría de Newton

Los experimentos, en los que dividió la luz blanca en sus componentes de color usando un prisma y luego recreó un haz blanco usando lentes, revelaron la verdad.

Newton también investigó la reflexión. Demostró que los rayos de luz siempre se reflejan en líneas rectas y proyectan sombras muy definidas. En su opinión, la luz ondulatoria mostraría más signos de curvarse y extenderse, por lo que concluyó que la luz debía ser corpuscular y estar compuesta de partículas diminutas y grumosas. Newton publicó sus hallazgos en 1675 y los desarrolló aún más en su libro. *óptica* en 1704. Su premisa dominó las teorías sobre la luz durante más de un siglo.

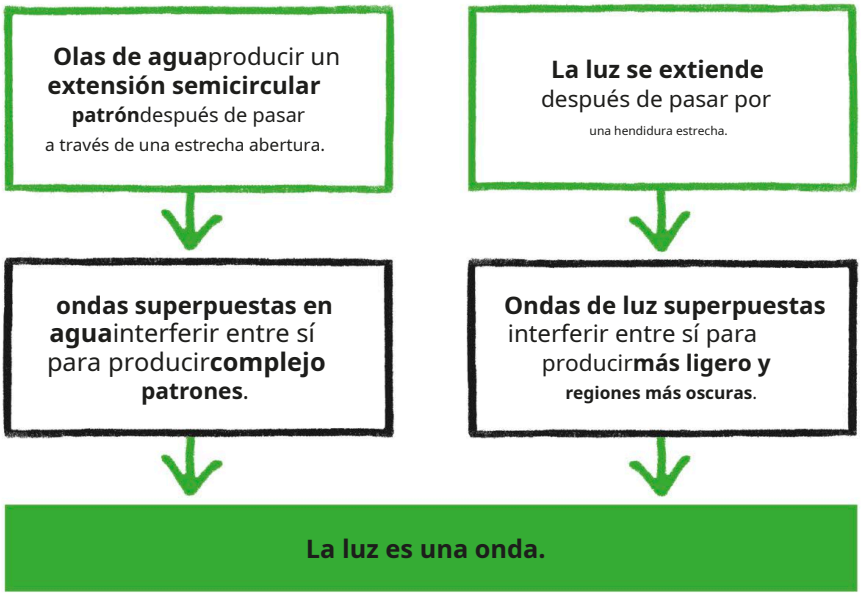
Curvas ligeras

El trabajo de Newton tuvo algunos fallos, particularmente en lo que respecta a la refracción. En 1690, el científico e inventor holandés Christiaan Huygens publicó *Tratado sobre la luz*, en el que explicó cómo la luz

> “Uno puede concebir la luz para propagarse sucesivamente, por ondas esféricas.”
> **Christian Huygens**

se dobla cuando pasa entre diferentes medios (como agua y aire) en términos de comportamiento ondulatorio. Huygens rechazó el modelo corpuscular basándose en que dos haces podían chocar sin dispersarse en forma inesperada.

direcciones. Sugirió que la luz era una perturbación que se movía a una velocidad muy alta (aunque finita) a través de lo que llamó el "éter luminífero", un medio portador de luz.--



> Los experimentos que estoy a punto de relatar... pueden repetirse con gran facilidad, siempre que sea necesario. el sol brilla, y sin ninguna otro aparato que no sea el mano a cada uno.
> **Tomás joven**

Huygens desarrolló un principio útil según el cual cada punto del "frente de onda" que avanza de un haz de luz se trata como una fuente de "ondas" más pequeñas que se propagan en todas direcciones. El curso general del haz se puede predecir encontrando la dirección en la que las ondas se alinean y se refuerzan entre sí.

Los experimentos de Young.
Durante la mayor parte del siglo XVIII, el modelo corpuscular dominó el pensamiento sobre la luz. Eso cambió a principios del siglo XIX con el trabajo del erudito británico Thomas Young. Como estudiante de medicina en la década de 1790, Young investigó las propiedades de las ondas sonoras y se interesó por los fenómenos ondulatorios generales. Las similitudes entre el sonido y la luz lo convencieron de que la luz también podría formar ondas, y en 1799 escribió una carta exponiendo su argumento a

la Sociedad Real de Londres.

Ante el feroz escepticismo de los seguidores del modelo de Newton, Young se dedicó a idear experimentos que demostrarían el comportamiento ondulatorio de la luz más allá de toda duda. Con una astuta comprensión del poder de la analogía, construyó una onda tanque: un baño de agua poco profundo con una paleta en un extremo para generar olas periódicas. Colocar obstáculos en la bañera, como una barrera con una o más aberturas, le permitió estudiar el comportamiento de las olas. Mostró cómo después de pasar a través de una estrecha rendija en una barrera, ondas rectas paralelas producirían un patrón semicircular que se expande, un efecto similar a la difracción de la luz a través de aberturas estrechas.

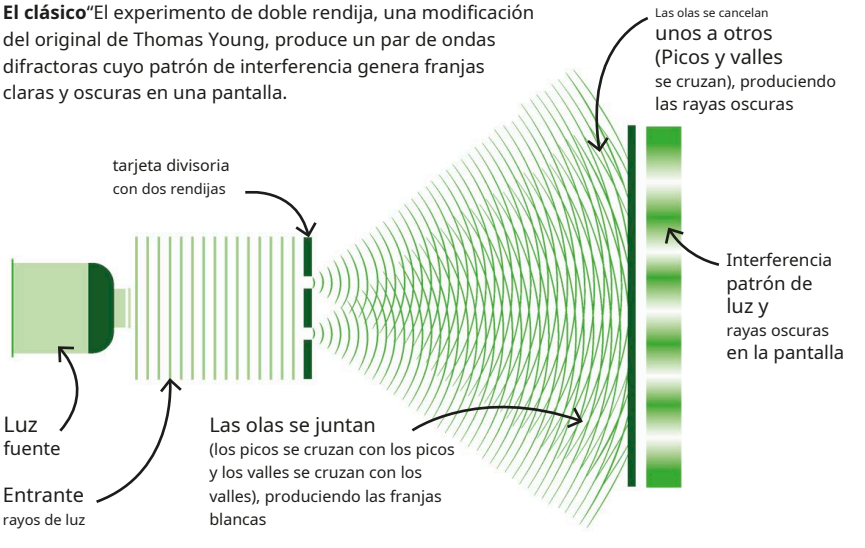
Una barrera con dos rendijas creó un par de patrones de ondas que se extendían y se superponían. Las ondas de las dos rendijas podían pasar libremente entre sí y, cuando se cruzaban, la altura de la ola estaba determinada por las fases de las ondas superpuestas, un efecto conocido como interferencia. Cuando dos picos de onda o dos valles se superponían, aumentaban la altura o profundidad de la onda; cuando un pico y un valle se encontraban, se anulaban mutuamente.

El siguiente paso de Young, esbozado en una conferencia ante la Royal Society en 1803, fue demostrar que la luz se comportaba de forma similar a las ondas. Para ello, dividió un estrecho haz de luz solar en dos haces utilizando un trozo de cartulina fina y comparó desde la forma en que iluminaban una pantalla hasta cómo la iluminaba un solo haz. Un patrón de áreas claras y oscuras apareció en la pantalla cuando la tarjeta divisoria estaba en su lugar, pero desapareció cuando se quitó la tarjeta. Young había demostrado elegantemente que la luz se comportaba del mismo modo que las ondas del agua: cuando los dos haces separados se difractaban y se superponían, áreas de mayor y menor intensidad interactuaban para producir un patrón de interferencia que la teoría corpuscular no podía explicar. (El experimento se perfeccionó más tarde con dos rendijas estrechas en una superficie de vidrio opaco, por lo que se conoció como el "experimento de la doble rendija".)

Young argumentó que su demostración demostraba sin lugar a dudas que la luz era una onda. Es más, los patrones variaban según el color de la luz difractada, lo que implicaba que los colores estaban determinados por las longitudes de onda.

Si bien el experimento de Young revivió el debate sobre la naturaleza de la luz, la teoría ondulatoria de la luz aún no era plenamente aceptada. A pesar de las primeras ideas de Hooke, la mayoría de los científicos

El clásico"El experimento de doble rendija, una modificación del original de Thomas Young, produce un par de ondas difractoras cuyo patrón de interferencia genera franjas claras y oscuras en una pantalla.



Tomás joven

Young, el mayor de 10 hermanos, nació en una familia cuáquera en el condado inglés de Somerset en 1773. Un erudito nato, dominó varios idiomas antiguos y modernos cuando era niño, antes de estudiar medicina. Después de dejar huella con su investigación científica privada, en 1801 fue nombrado profesor de la recién fundada Royal Institution, pero luego dimitió para evitar conflictos con su práctica médica.

Young continuó estudiando y experimentando e hizo valiosas contribuciones en muchos campos. Avanzó en la traducción. de los jeroglíficos egipcios, explicó el funcionamiento del ojo, investigó las propiedades de los materiales elásticos y Desarrolló un método para afinar instrumentos musicales. Su muerte en 1829 fue ampliamente lamentada en la comunidad científica.

Trabajos clave

1804"Experimentos y cálculos relativos a la óptica física"
1807*Un curso de conferencias sobre filosofía natural y artes mecánicas*

(incluido el propio Young) al principio supusieron que si la luz era una onda, debía ser un sonido longitudinal, donde la perturbación del medio se movía hacia adelante y hacia atrás en paralelo a la dirección de propagación. Esto provocó que algunos fenómenos luminosos, como polarización, imposible de explicar a través de ondas.

Una solución surgió en Francia en 1816, cuando André-Marie Ampère sugirió a Augustin-Jean Fresnel que las ondas podrían ser transversales, lo que explicaría el comportamiento de la luz polarizada. Fresnel produjo una detallada teoría ondulatoria de la luz que también explicaba los efectos de la difracción.

Propiedades electromagnéticas

La aceptación de la naturaleza ondulatoria de la luz coincidió con el desarrollo de estudios sobre la electricidad y el magnetismo. En la década de 1860, James Clerk Maxwell pudo describir la luz mediante una serie de elegantes ecuaciones como una perturbación electromagnética que se movía a 299 792 km (186 282 millas). por segundo.

Sin embargo, todavía había preguntas incómodas en torno al llamado "éter luminífero" de Huygens, a través del cual la luz supuestamente viajó. La mayoría de los expertos creían que las ecuaciones de Maxwell describían la velocidad a la que la luz entraría al éter desde una fuente. El fracaso de experimentos cada vez más sofisticados diseñados para detectar este medio portador de luz planteó cuestiones fundamentales y creó una crisis que sólo fue resuelta por la teoría de la relatividad especial de Einstein.

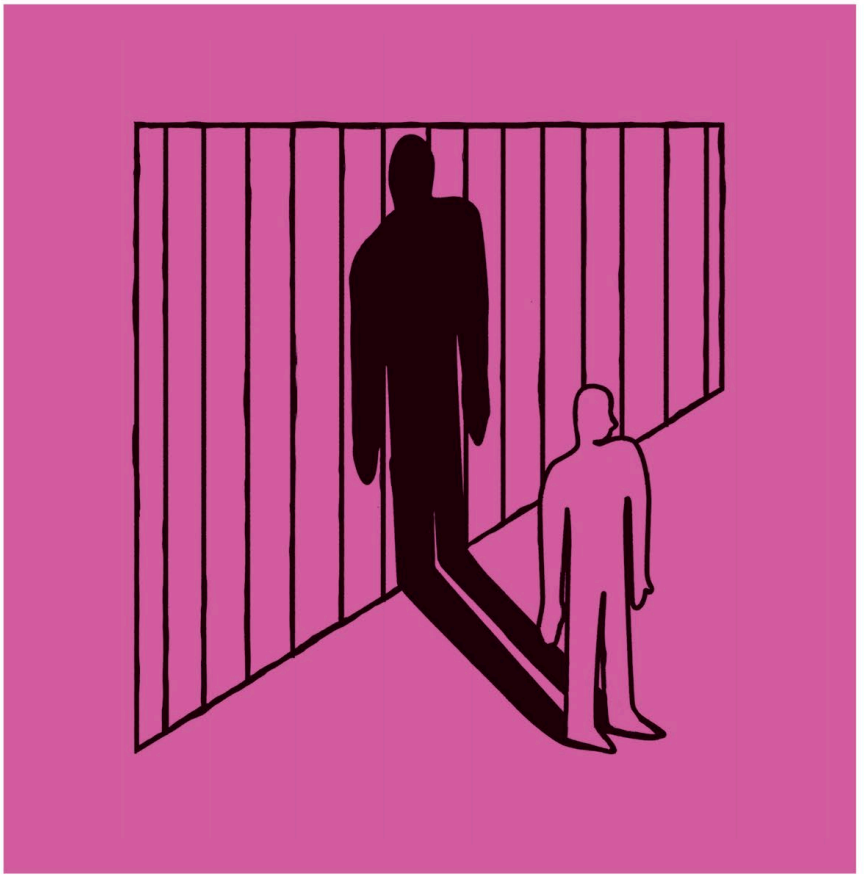
Ondas y partículas

Einstein fue en gran medida responsable de un cambio final en nuestra comprensión de la luz. En 1905, propuso una explicación para el efecto fotoeléctrico, un fenómeno en el que corrientes fluyen desde la superficie de ciertos metales cuando se exponen a ciertos tipos de luz. Los científicos estaban desconcertados por el hecho de que una débil cantidad de luz azul o ultravioleta provocaría que una corriente fluyera desde algunos metales mientras permanecían inactivos incluso bajo la luz roja más intensa. Einstein sugirió (basándose en el concepto de cuantos de luz previamente utilizado por Max Planck) que a pesar de ser fundamentalmente ondulatoria, la luz viaja en pequeñas explosiones similares a partículas, ahora llamados fotones. La intensidad de una fuente de luz depende de la cantidad de fotones que produce, pero la energía de un fotón individual depende de su longitud de onda o frecuencia; por lo tanto, los fotones azules de alta energía pueden proporcionar electrones con suficiente energía para fluir, mientras que los rojos de menor energía pueden proporcionar electrones con suficiente energía para fluir. , incluso en grandes cantidades, no pueden. Desde principios del siglo XX, numerosos experimentos han confirmado el hecho de que la luz puede comportarse como una onda o como una partícula.

> [Tenemos] buenas razones para concluir que la luz misma [...] es un electromagnético perturbación en forma de ondas que se propagan [...] según las leyes del electromagnetismo.
> **James Clerk Maxwell**

LA LUZ ES NUNCA CONOCIDO PARA DOBLARSE LA SOMBRA

DIFRACCIÓN E INTERFERENCIA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Augustin-Jean Fresnel
(1788–1827)

ANTES
1665 Robert Hooke compara el movimiento de la luz con la propagación de las olas en el agua.

1666isaac newton
Demuestra que la luz del sol se compone de diferentes colores.

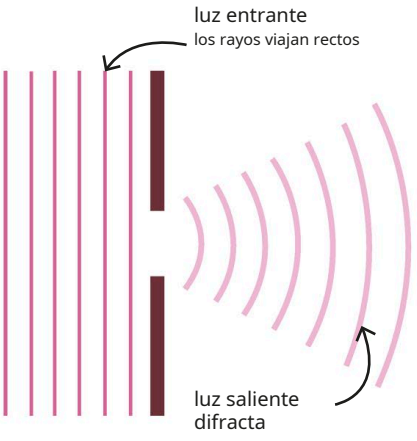
DESPUÉS
1821 Augustin-Jean Fresnel publica su trabajo sobre polarización, sugiriendo por primera vez que la luz es una onda transversal (parecida al agua) en lugar de una onda longitudinal (parecida al sonido).

1860 En Alemania, Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen utilizan rejillas de difracción para vincular "líneas de emisión" brillantes de luz en longitudes de onda específicas con diferentes elementos químicos.

Diferentes tipos de ondas comparten comportamientos similares, como la reflexión (rebotan en una superficie en el mismo ángulo a medida que se acercan a la superficie), refracción (cambio de dirección en los límites entre medios) y difracción: la forma en que una onda se propaga alrededor de obstáculos o se propaga cuando pasa a través de una abertura. Un ejemplo de difracción es la forma en que las ondas de agua se propagan hacia la región de sombra más allá de una barrera. El descubrimiento de que la luz también presenta difracción fue clave para demostrar su naturaleza ondulatoria.

La difracción de la luz fue observada sistemáticamente por primera vez en la década de 1660 por Francesco Maria.

Ver también: Efecto de reflexión y refracción 168–169 y corrimiento al rojo 188–191 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Polarización 184–187 · El Doppler · Ondas electromagnéticas 192-195 · Partículas y ondas 212–215



Cuando las ondas de luz lineales pasan a través de una abertura estrecha en una barrera, se difractan (se expanden) en frentes de onda semicirculares.

Grimaldi, sacerdote jesuita y físico en Italia. Grimaldi construyó una habitación oscura con una abertura estenopeica a través de la cual podía entrar un rayo de luz solar del ancho de un lápiz e incidir en una pantalla en ángulo. Cuando el rayo incidió en la pantalla, creó un círculo de luz ovalado, que Grimaldi midió. Luego colocó una varilla delgada en el camino del haz de luz y midió el tamaño de la sombra que proyectaba dentro del área iluminada. Luego, Grimaldi comparó sus resultados con cálculos basados en el supuesto de que la luz viaja en línea recta. Descubrió que no sólo la sombra era más grande de lo que tales cálculos sugerían, sino que también lo era el óvalo iluminado.

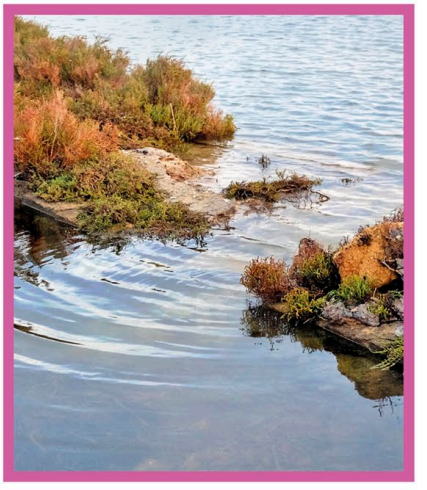
La conclusión que Grimaldi sacó de estas comparaciones fue que la luz no estaba compuesta de partículas simples (corpúsculos) que viajaban en línea recta, sino que tenía propiedades ondulatorias, similares a las del agua, que permitió que se doblara. Fue Grimaldi quien acuñó el término "difracción" para describir esto. Sus hallazgos, publicados póstumamente en 1665, fueron una espina en el costado de Científicos que intentan demostrar la naturaleza corpuscular de la luz.

Teorías en competencia

En la década de 1670, Isaac Newton trató la difracción (a la que llamó "inflexión") como un tipo especial de refracción que se producía cuando los rayos de luz (que él creía que eran corpusculares) pasaban cerca de obstáculos. Aproximadamente al mismo tiempo, el rival de Newton, Robert Hooke, puso en duda su teoría al realizar con éxito

demostraciones de los experimentos de Grimaldi, y el científico e inventor holandés Christiaan Huygens propuso su propia teoría ondulatoria de la luz. Huygens argumentó que muchos fenómenos ópticos sólo podrían explicarse si la luz se tratara como un "frente de onda" en avance, a lo largo del cual cualquier punto era una fuente de ondas secundarias, cuyas la interferencia y el refuerzo determinaron la dirección en la que se movía el frente de onda.

> La naturaleza no se avergüenza de las dificultades de análisis. Ella evita las complicaciones sólo en medios.
>
> **Augustin-Jean Fresnel**



Como ondas de luz, las ondas generadas por el viento en un lago se extienden en ondas circulares cuando pasan a través de un espacio estrecho, lo que ilustra la propiedad de difracción común a todas las ondas.

Ni la teoría ondulatoria de la luz ni la teoría corpuscular de Newton explicaban el fenómeno de las franjas coloreadas, algo que Grimaldi había observado tanto en los bordes del círculo iluminado como en la sombra de la varilla en sus experimentos. La lucha de Newton con esta cuestión le llevó a proponer algunas ideas intrigantes. Sostuvo que la luz era estrictamente corpuscular, pero que cada corpúsculo en rápido movimiento podía actuar como fuente de ondas periódicas cuyas vibraciones determinaban su color.

Los experimentos de Young.
La teoría mejorada de la luz de Newton, publicada en su libro *óptica* en 1704, no resolvió por completo las cuestiones relativas a la difracción, pero el modelo corpuscular fue ampliamente aceptado hasta 1803, cuando la demostración de Thomas Young de la interferencia entre ondas de luz difractadas condujo a un resurgimiento de-

Agustín-Jean fresnel

Fresnel, segundo de cuatro hijos de un arquitecto local, nació en Broglie, Normandía, Francia, en 1788. En 1806, se matriculó para estudiar ingeniería civil en la Escuela Nacional de Puentes y Carreteras y se convirtió en ingeniero gubernamental.

Suspendido brevemente de Tras trabajar por sus opiniones políticas durante los últimos días de las guerras napoleónicas, Fresnel continuó su interés por la óptica. Animado por el físico François Arago, escribió ensayos y una memoria premiada sobre el tema, incluido un tratamiento matemático de la difracción. Más tarde, Fresnel explicó la polarización utilizando un modelo de luz como onda transversal y desarrolló una lente para enfocar intensos rayos de luz direccionales (utilizados principalmente en faros). Murió en 1827, a la edad de 39 años.

Trabajos clave

1818*Memorias sobre la difracción de la luz*
1819"Sobre la acción de los rayos de luz polarizada entre sí" (con François Arago)

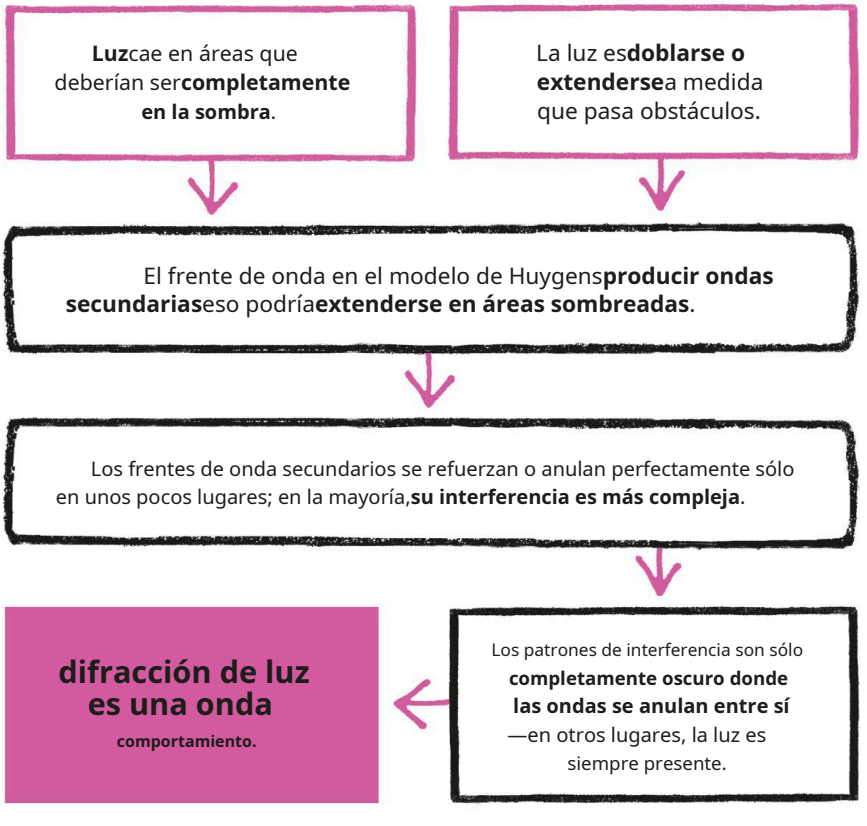
Interés por las ideas de Huygens. Young propuso dos modificaciones al modelo de Huygens que podrían explicar la difracción. Una era la idea de que los puntos de un frente de onda en los bordes mismos de la apertura abierta producían ondas que se extendían hacia la región de "sombra" más allá de la barrera. La otra fue que el patrón de difracción observado se produjo a través de una onda que pasaba cerca del borde de la apertura e interfería con una onda que rebotaba en los lados de la barrera.

Young también propuso que debía haber una distancia en la que la luz estuviera lo suficientemente alejada del borde como para no verse afectada por la difracción. Si esta distancia variara entre los diferentes colores de la luz, sostenía Young, podría explicar las franjas de colores descubiertas por Grimaldi. Por ejemplo, si hay

Si es una distancia en la que la luz roja todavía se difracta, pero la luz azul no, entonces aparecerán franjas rojas.

Avance crucial

En 1818, la Academia Francesa de Ciencias ofreció un premio por una explicación completa del "problema de la inflexión" identificado por Young. El ingeniero civil Augustin-Jean Fresnel había estado trabajando precisamente en esta cuestión durante varios años, realizando una serie de complejos experimentos caseros y compartiendo sus hallazgos con el académico François Arago. Algunos de sus trabajos replicaron involuntariamente los de Young, pero también hubo nuevas ideas, y Arago animó a Fresnel a presentar una memoria explicativa para el concurso del premio. En estas memorias, Fresnel dio una explicación matemática compleja.



Los coloresen una pompa de jabón son causados por la interrupción de las ondas de luz cuando se reflejan en la fina película de la burbuja e interfieren entre sí.

ecuaciones para describir la posición y la intensidad de las "franjas" de interferencia clara y oscura y demostraron que coincidían con los resultados de experimentos reales.

Fresnel también demostró que la geometría de las franjas dependía de la longitud de onda de la luz que las producía. Por primera vez, fue posible medir las franjas de interferencia producidas por una fuente de luz monocromática (de un solo color) y así calcular la longitud de onda de ese color específico.

En las memorias, Fresnel resumió la diferencia entre la teoría ondulatoria de Huygens y la suya propia con notable simplicidad. El error de Huygens, dijo, fue suponer que la luz sólo se propagaría donde las ondas secundarias se reforzaran exactamente entre sí. En realidad, sin embargo, la oscuridad total sólo es posible cuando las ondas se anulan exactamente entre sí.

A pesar de su elegancia, las memorias premiadas de Fresnel enfrentaron una recepción escéptica por parte de un panel de jueces que apoyaba mayoritariamente la teoría corpuscular de Newton. Como uno de los Como señalaron los jueces Siméon-Denis Poisson, las ecuaciones de Fresnel predijeron que la sombra proyectada por un obstáculo circular iluminado por una fuente puntual de luz, como un agujero de alfiler, debería tener un punto brillante en su mismo centro, una idea que Poisson creía que era absurdo. El asunto se resolvió cuando Arago rápidamente construyó un experimento que produjo precisamente ese "punto de Poisson". A pesar de este éxito, la teoría ondulatoria no fue ampliamente aceptada hasta 1821, cuando Fresnel publicó su enfoque basado en ondas para explicar la polarización: cómo las ondas de luz transversales a veces se alinean en una dirección particular.

Difracción y dispersión

Mientras Young y Fresnel aprendían a comprender los efectos de la difracción y la interferencia dirigiendo haces de luz a través de dos rendijas estrechas, algunos fabricantes de instrumentos adoptaban un enfoque diferente. Ya en 1673, el astrónomo escocés James Gregory había observado que la luz del sol que pasa a través de los finos espacios en las plumas de un pájaro se extiende en un espectro similar al de un arco iris, similar al comportamiento de la luz blanca que pasa a través de un prisma.

En 1785, el inventor estadounidense David Rittenhouse logró replicar el efecto de Gregory. pluma de ave artificialmente enrollando pelos finos entre dos tornillos fuertemente roscados para crear una malla con una densidad de alrededor de 100 pelos por pulgada. Este dispositivo fue perfeccionado en 1813 por el físico y fabricante de instrumentos alemán Joseph von Fraunhofer, quien lo llamó “rejilla de difracción”. Fundamentalmente, las rejillas de difracción ofrecen un medio mucho más eficiente para dividir la luz que los prismas de vidrio porque absorben muy poca luz.

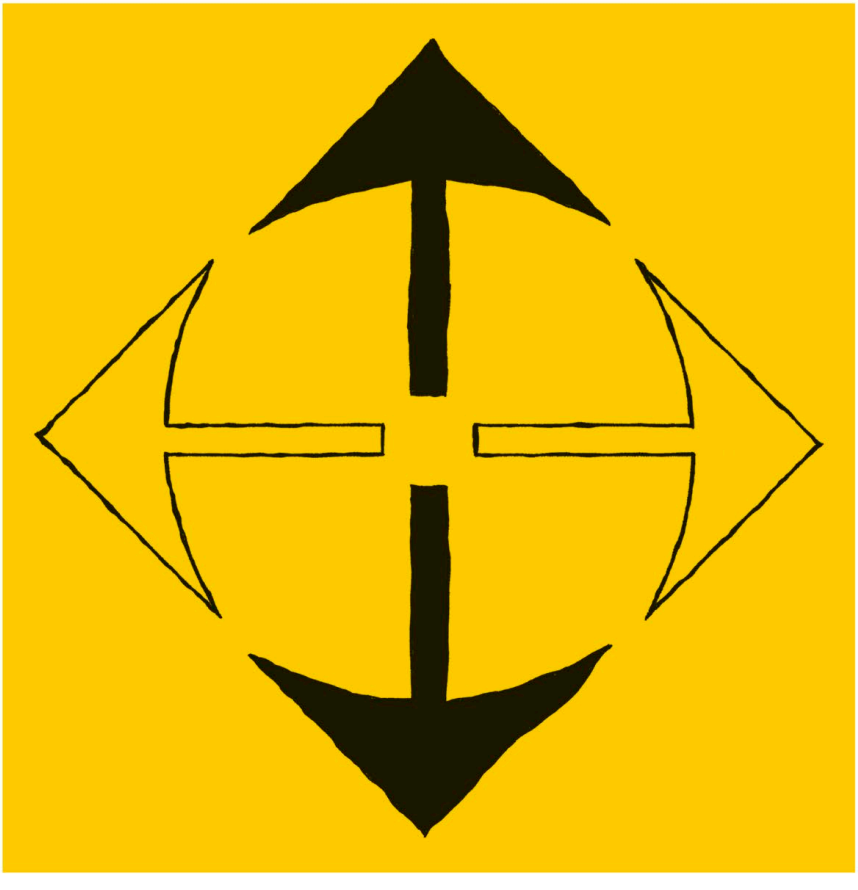
golpeándolos. Por tanto, son ideales para producir espectros a partir de fuentes débiles. Las rejillas y los instrumentos relacionados han llegado a ser extremadamente útiles en muchas ramas de la ciencia.

Fraunhofer también construyó el primer “motor gobernante”, una máquina que trazaba minuciosamente líneas transparentes estrechamente espaciadas en una placa de vidrio cubierta con una capa superficial que de otro modo sería opaca. Este dispositivo le permitió difundir la luz solar en un espectro mucho más amplio de lo que se podía lograr anteriormente, revelando la presencia de lo que se conoció como “líneas de Fraunhofer”, que más tarde desempeñarían un papel clave en la comprensión de la química de las estrellas y los átomos.

> “Creo haber encontrado la explicación y la ley de las franjas de colores que se perciben en las sombras del cielo. cuerpos iluminados por un punto luminoso.”
>
> **Augustin-Jean Fresnel**

EL NORTE Y SUR LADOS DE EL RAYO

POLARIZACIÓN



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Étienne-Louis Malus
(1775-1812)

ANTES
siglo 13 Las referencias al uso de "piedras solares" en las sagas islandesas sugieren que los marineros vikingos pueden haber utilizado las propiedades de los cristales de espato islandeses para detectar la polarización en la navegación diurna.

DESPUÉS
1922 Georges Friedel investiga las propiedades de tres tipos de materiales de "cristal líquido" y observa su capacidad para alterar el plano de polarización de la luz.

1929inventor americano y el científico Edwin H. Land inventa la "Polaroid", un plástico cuyas hebras de polímero actúan como filtro para la luz polarizada, transmitiendo luz solo en un plano.

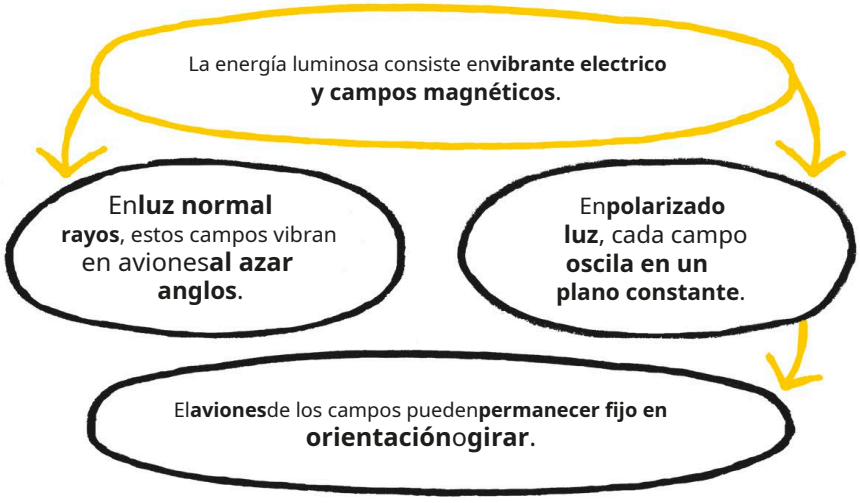
PAG

La polarización es la alineación [illegible] en un plano o dirección específica. El término suele aplicarse a la luz, pero cualquier onda transversal (que oscila en ángulo recto con la dirección de la onda) puede polarizarse. Varios fenómenos naturales producen luz polarizada (una porción de la luz solar reflejada en una superficie plana y brillante como, por ejemplo, un lago, está polarizada para coincidir con el ángulo de la superficie del lago) y la luz también puede polarizarse artificialmente.

La investigación de los diferentes efectos causados por la polarización ayudó a determinar que la luz es un fenómeno ondulatorio y también aportó evidencia importante

Ver también: Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142-147 · Luz de enfoque 170–175 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Difracción e interferencia 180–183 · Ondas electromagnéticas 192-195

> Creo que este fenómeno puede servir a los amantes de la naturaleza y otros interesados. personas para instrucción o en menos por placer.
>
> **Rasmus Bartolino**
>
> **sobre birrefringencia**



que es de naturaleza electromagnética. El primer relato de haces de luz idénticos que difieren por razones aparentemente inexplicables lo dio el científico danés Rasmus Bartholin en 1669. Descubrió que Ver un objeto a través de los cristales de un mineral transparente conocido como espato de Islandia (una forma de calcita) produjo una doble imagen de ese objeto.

Este fenómeno, conocido como birrefringencia, surge porque el cristal tiene un índice de refracción (velocidad a la que se transmite la luz) que cambia según la polarización de la luz que lo atraviesa. La luz reflejada por la mayoría de los objetos no tiene una polarización particular, por lo que, en promedio, la mitad de los rayos se dividen a lo largo de cada trayectoria y se crea una imagen doble.

Explicaciones tempranas

Bartholin publicó una discusión detallada sobre el efecto de birrefringencia en 1670, pero no pudo explicarlo en términos de ningún modelo de luz en particular. Christian Huygens, Uno de los primeros defensores de la teoría ondulatoria, argumentó que la velocidad de los rayos de luz que viajaban a través del cristal variaba según la dirección en la que se movían, y en 1690 utilizó su principio del "frente de onda" para modelar el efecto de duplicación de la imagen.

Huygens también llevó a cabo algunos experimentos nuevos, colocando un segundo cristal de mástil islandés delante del primero y girándolo. Cuando lo hizo, descubrió que el efecto de duplicación desaparecía en ciertos ángulos. No entendía por qué, pero reconoció que las dos imágenes producidas por el primer cristal eran diferentes entre sí en algún aspecto.

Isaac Newton sostuvo que la birrefringencia fortaleció su argumento a favor de la luz como un corpúsculo, una partícula con "lados" discretos que podrían verse afectados por su orientación. En opinión de Newton, el efecto ayudó a refutar la teoría ondulatoria, ya que el modelo de luz de Huygens involucraba ondas longitudinales (perturbaciones paralelas a la dirección de la onda) en lugar de ondas transversales. y Newton no podía imaginar cómo podían ser sensibles a la dirección.

Lados y postes

A principios del siglo XIX, el soldado y físico francés Étienne-Louis Malus llevó a cabo su propia versión de los experimentos de Huygens. Malus estaba interesado en postularse.

Gafas de sol con polarizadas. Las lentes reducen el intenso resplandor de la luz que se refleja en un paisaje nevado al permitir que pasen solo ondas de luz que han sido polarizadas en una dirección.

rigor matemático al estudio de la luz. Desarrolló un modelo matemático útil de lo que realmente les sucedía a los rayos de luz en tres dimensiones cuando encontraban materiales con diferentes propiedades reflectantes y refractivas. (Los modelos anteriores habían simplificado las cosas al considerar únicamente lo que sucedía con los rayos de luz que se movían en un único planeta plano en dos dimensiones).

En 1808, el Instituto Francés de Ciencias y Artes ofreció un premio por una explicación completa de la birrefringencia y animó a Malus a participar. Como muchos miembros del establishment científico francés, Malus seguía la teoría corpuscular de la luz y se esperaba que una explicación corpuscular de la birrefringencia pudiera ayudar a desacreditar la teoría ondulatoria recientemente expuesta.

avance en Gran Bretaña por Thomas Young. Malus desarrolló una teoría en la que los corpúsculos ligeros tenían lados y "polos" (ejes de rotación) distintos. Afirmó que los materiales birrefringentes refractaban los corpúsculos a lo largo de diferentes caminos dependiendo de la dirección de sus polos. Acuñó el término "polarización" para describir este efecto.

> ¿No tienen los rayos de luz varios lados, dotados de varias propiedades?
> **isaac newton**

Malus descubrió un aspecto nuevo e importante del fenómeno mientras utilizaba un trozo de mástil islandés para observar el reflejo del sol poniente en una ventana del Palacio de Luxemburgo en París. Se dio cuenta de que la intensidad de las dos imágenes del sol variaba a medida que giraba el cristal, y una u otra imagen desaparecía por completo con cada giro de 90 grados del cristal. Malus se dio cuenta de que esto significaba que la luz del sol ya había sido polarizada por el reflejo del cristal. Confirmó el efecto al hacer brillar la luz de una vela a través de un cristal birrefringente y observar cómo se reflejaba el par de rayos de luz resultante.

en un recipiente con agua mientras giraba el cristal; los reflejos desaparecerían y reaparecerían dependiendo de la rotación del cristal. Pronto desarrolló una ley (la ley de Malus) que describe cómo la intensidad de una imagen polarizada vista a través de un "filtro" de cristal se relaciona con la orientación del cristal.

Otros experimentos revelaron un efecto similar con reflejos de materiales transparentes. Malus notó que la interacción entre la superficie de los materiales y la luz no polarizada (con una mezcla aleatoria de orientaciones) reflejaba la luz en un plano específico de polarización en lugar de otros, mientras que la luz polarizada en el otro plano pasaba hacia o a través del nuevo medio (como agua o vidrio) a lo largo de una trayectoria refractada. Malus se dio cuenta de que el factor que determina si reflejar o refractar debe ser la estructura interna del nuevo medio, ligada a su índice de refracción.

Nuevas perspectivas

La identificación de Malus de un vínculo entre la estructura de un material y su efecto sobre la luz polarizada fue importante: una aplicación común hoy en día es estudiar el interior

Étienne-Louis Malus

Nacido en una familia parisina privilegiada en 1775, Malus mostró una temprana promesa matemática. Sirvió como soldado regular antes de asistir a la escuela de ingeniería École Polytechnique de París a partir de 1794, después de lo cual ascendió en las filas del cuerpo de ingenieros del ejército y participó en la expedición de Napoleón a Egipto (1798-1801). Al regresar a Francia, trabajó en proyectos de ingeniería militar.

A partir de 1806, un destino en París le permitió a Malus relacionarse con científicos destacados. Su talento para describir matemáticamente los comportamientos de la luz, incluyendo los reflejos "cáusticos" creados por superficies reflectantes curvas impresionaron a sus compañeros, y en 1810 su explicación de la birrefringencia le llevó a ser elegido miembro de la Academia de Ciencias. Un año más tarde, recibió la Medalla Rumford de la Royal Society por el mismo trabajo, a pesar de que Gran Bretaña estaba en guerra con Francia. Malus murió en 1812, a los 36 años.

Trabajos clave

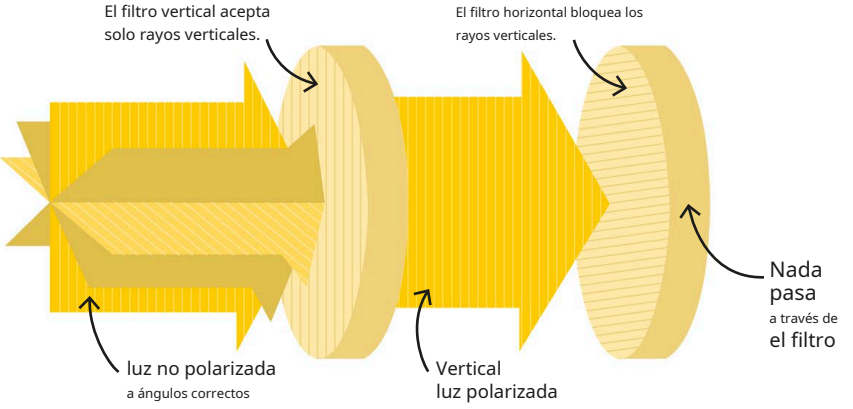
1807 *Tratado de óptica* **1811**" Memorias sobre algunos nuevos fenómenos ópticos"

cambios en los materiales bajo tensión debido a la forma en que afectan la luz polarizada. Intentó identificar una relación entre el índice de refracción de un material y el ángulo en el que la luz reflejada desde una superficie estaría perfectamente "plano polarizada" (alineada en un solo plano). Encontró el ángulo correcto para el agua, pero se vio frustrado por la mala calidad de otros materiales que investigó; Unos años más tarde, en 1815, el físico escocés David Brewster encontró una ley general.

La gama de fenómenos relacionados con la polarización creció. En 1811, el físico francés François Arago descubrió que al pasar luz polarizada a través de cristales de cuarzo se podía rotar su eje de polarización (un efecto conocido ahora como “actividad óptica”), y su contemporáneo Jean-Baptiste Biot informó que la luz del arco iris estaba altamente polarizada.

Biot pasó a identificar la actividad óptica en los líquidos y formuló el concepto de polarización circular (en la que el eje de polarización gira a medida que avanza el rayo de luz). También descubrió minerales “dicroicos”, que son materiales naturales que permiten el paso de la luz si está polarizada a lo largo de un eje, pero bloquean

> “Encontramos que la luz adquiere propiedades que son relativo sólo a los lados del rayo... daré la nombre de los polos a estos lados del rayo.”
> **Étienne-Louis Malus**



Ondas de luz no polarizadasoscilan en ángulo recto con respecto a su dirección de propagación (movimiento) en direcciones aleatorias. Las ondas de luz polarizadas planas oscilan en una sola dirección, mientras que las ondas polarizadas circulares giran de manera constante a medida que se propagan.

luz polarizada a lo largo del otro eje. El uso de materiales dicroicos se convertiría en una de las formas en que se podría producir fácilmente luz polarizada. Otros incluyeron el uso de ciertos tipos de vidrio y prismas de calcita con formas especiales.

Ondas polarizadas

En 1816, Arago y su protegido Augustin-Jean Fresnel hicieron un descubrimiento inesperado e importante que socavó las afirmaciones de que la polarización sustentaba la naturaleza corpuscular de la luz. Crearon una versión del experimento de "doble rendija" de Thomas Young utilizando dos haces de luz cuya polarización podía alterarse, y descubrieron que los patrones de luz y oscuridad causados por la interferencia entre los dos haces eran más fuertes cuando tenían la misma polarización. Pero los patrones se desvanecieron a medida que aumentó la diferencia de polarización, y desaparecieron por completo cuando los planos de polarización formaron ángulos rectos entre sí.

Este descubrimiento era inexplicable mediante cualquier teoría corpuscular de la luz y no podía explicarse imaginando la luz como una longitud longitudinal. ola. André-Marie Ampère sugirió a Fresnel que se podría encontrar una solución tratando la luz como una onda transversal. Si este fuera el caso, se deducía que el eje de polarización sería el plano en el que la onda oscilaba (vibraba). Thomas Young llegó a la misma conclusión cuando Arago le habló del experimento, pero fue Fresnel quien se inspiró para crear una teoría ondulatoria integral de la luz, que

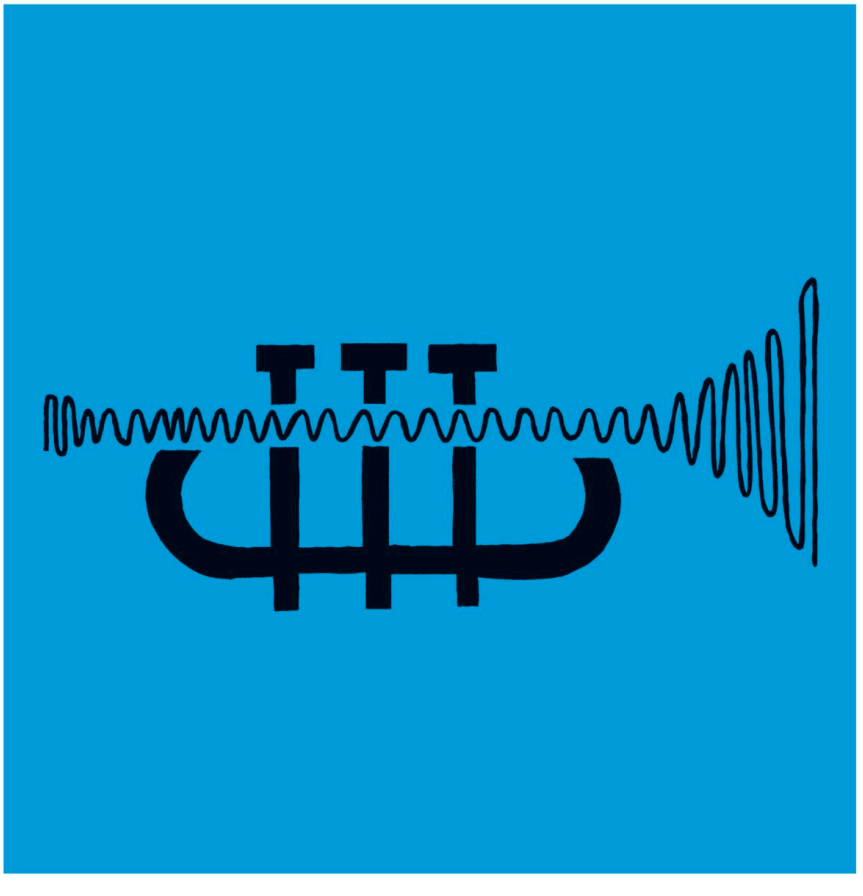
eventualmente desplazará a todos los modelos más antiguos.

La polarización también jugaría un papel clave en el próximo gran avance en la comprensión de la luz. En 1845, el científico británico Michael Faraday, buscando una manera de probar el vínculo sospechoso entre la luz y el electromagnetismo, decidió ver qué pasaría si proyectara un rayo de luz polarizada a través de un campo magnético. Descubrió que podía rotar el plano de polarización

alterando la fuerza del campo. Este fenómeno, conocido como efecto Faraday, inspiraría en última instancia a James Clerk Maxwell a desarrollar su modelo de luz como onda electromagnética.

EL TROMPETEROS Y EL TREN DE ONDAS

EL EFECTO DOPPLER Y EL DESPLAZAMIENTO AL ROJO



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
cristian doppler
(1803–1853)

ANTES

1727 El astrónomo británico James Bradley explica la aberración de la luz de las estrellas: un cambio en el ángulo en el que la luz procedente de las estrellas estrellas distantes se acercan a la Tierra, causado por el movimiento de la Tierra alrededor del sol.

DESPUÉS

década de 1940"El radar Doppler se desarrolló para la aviación y la previsión meteorológica después de que las primeras formas de radar no tuvieran en cuenta las precipitaciones y los cambios Doppler de los objetivos en movimiento.

1999 Basándose en observaciones de estrellas en explosión, los astrónomos descubren que algunas galaxias distantes están más lejos de lo que sugieren sus desplazamientos Doppler, lo que implica que la expansión del universo se está acelerando.

Hoy en día, el efecto Doppler es una parte familiar de nuestra vida cotidiana. Lo notamos como el cambio en el tono de las ondas sonoras cuando un vehículo con una sirena de emergencia acelera hacia nosotros, nos adelanta y continúa en la distancia. El efecto lleva el nombre del científico que lo propuso por primera vez como predicción teórica. Aplicado a la luz, ha resultado ser una poderosa herramienta para aprender sobre el universo.

Explicando los colores de las estrellas.
La idea de que las ondas (específicamente, las ondas de luz) podrían cambiar su frecuencia dependiendo del movimiento relativo de la fuente y el

Ver también: Luz grumosa y ondulada 176–179 · Descubriendo otras galaxias 290–293 · El universo estático o en expansión 294–295 Energía oscura 306–307

> [El efecto Doppler] en el futuro un futuro no muy lejano ofrecerá a los astrónomos un medio bienvenido para determinar los movimientos y distancias de tales estrellas.
>
> **cristian doppler**

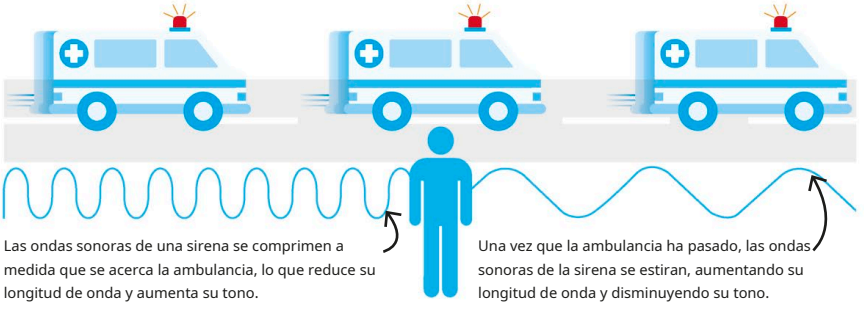
El observador fue propuesto por primera vez por el físico austriaco Christian Doppler en 1842. Doppler estaba investigando la aberración de la luz de las estrellas (un ligero cambio en la dirección aparente de la luz de estrellas distantes, causado por el movimiento de la Tierra alrededor del Sol) cuando se dio cuenta de que el movimiento a través del espacio causaría un cambio en la frecuencia y, por tanto, en el color de la luz.

El principio detrás de la teoría es el siguiente. Cuando la fuente y el observador se acercan, los "picos" en las ondas de luz de la fuente pasan al observador en una frecuencia más alta de lo que lo harían de otro modo, por lo que la longitud de onda medida de la luz es más corta. Por el contrario, cuando la fuente y el observador se separan, los picos de la onda llegan al observador con una frecuencia más baja de lo que lo harían de otro modo. El color de la luz es
Depende de su longitud de onda, por lo que la luz de un objeto que se acerca aparece más azul (debido a sus longitudes de onda más cortas) de lo que sería de otra manera, mientras que la luz de un objeto que se aleja aparece más roja.

Doppler esperaba que este efecto (que pronto recibió su nombre) ayudaría a explicar los diferentes colores de las estrellas en el cielo nocturno vistas desde la Tierra. Elaboró su teoría para tener en cuenta el movimiento de la Tierra a través del espacio, pero no se dio cuenta de la magnitud por la cual la velocidad de los movimientos estelares es eclipsada por la velocidad de la luz, haciendo que el efecto sea indetectable con los instrumentos de la época.

Sin embargo, el descubrimiento de Doppler fue confirmado en 1845, gracias a un ingenioso experimento con el sonido. Aprovechando la recién inaugurada línea ferroviaria Ámsterdam-Utrecht, el científico holandés CHD Buys Ballot pidió a un grupo de músicos que tocaran un sencillo-

Ondas sonorasse extienden a la misma velocidad en todas las direcciones cuando se miden en relación con la fuente. Pero si una sirena se acerca a un observador, la frecuencia de la onda aumenta y la longitud de onda se acorta.



Las ondas sonoras de una sirena se comprimen a medida que se acerca la ambulancia, lo que reduce su longitud de onda y aumenta su tono.

Una vez que la ambulancia ha pasado, las ondas sonoras de la sirena se estiran, aumentando su longitud de onda y disminuyendo su tono.

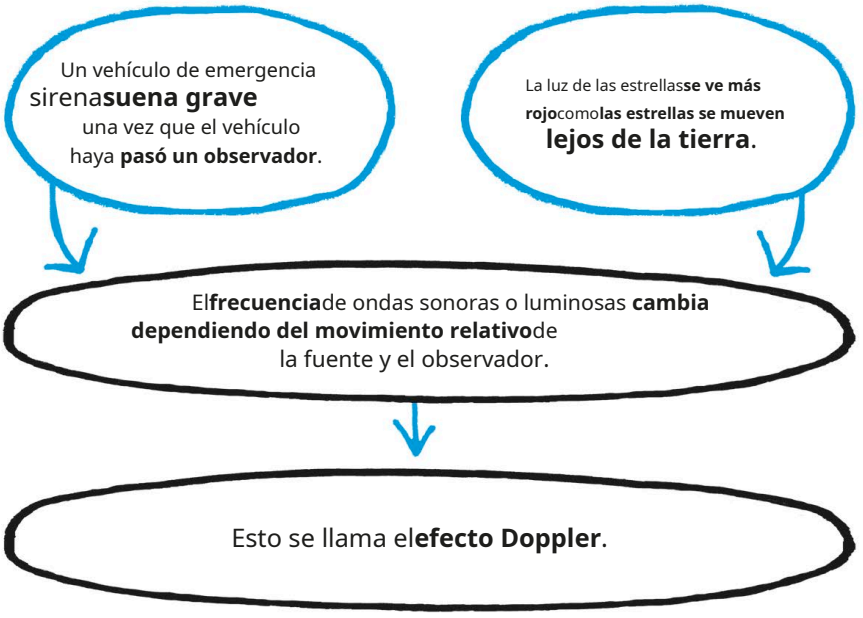
cristian doppler

Nacido en la ciudad austriaca de Salzburgo en 1803 en el seno de una familia adinerada, Doppler estudió Matemáticas en el Instituto Politécnico de Viena y luego realizó un posgrado en Física y Astronomía. Frustrado por la burocracia que implicaba conseguir un puesto permanente, estuvo a punto de abandonar la academia y emigrar a Estados Unidos, pero finalmente encontró empleo como profesor de matemáticas en Praga.

Doppler se convirtió en profesor del Politécnico de Praga en 1838, donde produjo una gran cantidad de artículos sobre matemáticas y física, incluido un célebre estudio sobre los colores de las estrellas y el fenómeno.
ahora conocido como efecto Doppler. En 1849, su reputación era tal que le asignaron un puesto importante en la Universidad de Viena. Su salud, delicada durante gran parte de su vida, se deterioró y murió de un golpe en el pecho.
infección en 1853.

Obra clave

1842*Sobre la luz de la luz del doble*
(*Sobre la luz coloreada de las estrellas dobles*)



Nota continua mientras viaja en el tren. Mientras el vagón pasaba a toda velocidad junto a él, Buys Ballot experimentó el ahora familiar cambio de tono del sonido: el tono alto de la nota cuando el tren se acercaba a él se hizo más bajo a medida que el tren se alejaba.

Midiendo el cambio

Los efectos del desplazamiento Doppler sobre la luz fueron calculados por el físico francés Armand Fizeau en 1848. Sin conocer el propio trabajo de Doppler, proporcionó una base matemática para el concepto de desplazamientos de la luz roja y azul. Doppler había sugerido que su teoría permitiría una nueva comprensión de los movimientos, distancias y relaciones de las estrellas, pero Fizeau sugirió una forma práctica de detectar cambios en la luz de las estrellas. Reconoció correctamente que los cambios en el color general de una estrella serían diminutos y difíciles de cuantificar. En cambio, propuso que

Los astrónomos pudieron identificar lo que conocemos como cambios Doppler a través de las posiciones de las "líneas de Fraunhofer".

Líneas estrechas y oscuras, como las que ya se observan en el espectro del Sol y que se presume existen en los espectros de otras estrellas, que podrían actuar como puntos de referencia definidos en un espectro de luz.

Sin embargo, poner esta idea en práctica requirió importantes avances en la tecnología. A distancias tan grandes, incluso las estrellas más brillantes son mucho más débiles que el Sol, y los espectros creados cuando su luz se divide por difracción (para medir líneas espectrales individuales) son aún más débiles. Los astrónomos británicos William y Margaret Huggins midieron el espectro de la luz del sol en 1864, y su colega William Allen Miller pudo utilizar las mediciones para identificar elementos en estrellas distantes.

Para entonces, los científicos alemanes Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen habían demostrado que las líneas de Fraunhofer del sol eran causadas por elementos específicos que absorbían luz, lo que permitió a los astrónomos calcular las longitudes de onda en las que se encontrarían estas líneas de absorción.

Aparecen en el espectro de una estrella estática. En 1868, William Huggins midió con éxito el desplazamiento Doppler de las líneas espectrales de Sirio, la estrella más brillante del cielo.

Vislumbrando más profundamente

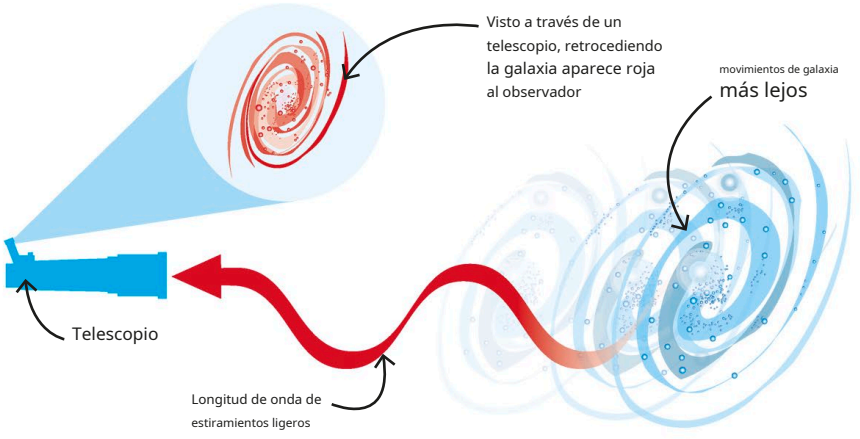
A finales del siglo XIX, la dependencia de la astronomía en observaciones minuciosas se transformó gracias a las mejoras en la fotografía, que permitieron a los científicos medir los espectros y los cambios Doppler de estrellas mucho más débiles. La fotografía de larga exposición recogió mucha más luz que el ojo humano y produjo imágenes que podían almacenarse, compararse y medirse mucho después de la observación original.

El astrónomo alemán Hermann Carl Vogel fue pionero en esta combinación de fotografía y "espectroscopia" en las décadas de 1870 y 1880, lo que condujo a importantes descubrimientos. En particular, identificó muchas estrellas aparentemente únicas con líneas espectrales que periódicamente se "duplicaban", separándose y luego reuniéndose en un ciclo regular. Demostró que esta división de líneas surgió porque las estrellas son pares binarios, visualmente

estrellas inseparables cuyas órbitas cercanas una alrededor de la otra significan que cuando una estrella se retira de la Tierra

> [El] color y la intensidad de [...] la luz, y el tono y la fuerza de un sonido serán alterados por un movimiento del fuente de la luz o del sonido...
> **Guillermo Huggins**

El llamado corrimiento al rojo "cosmológico"No es causado por galaxias que se separan en el sentido convencional, sino por el estiramiento del espacio mismo a medida que el universo se ha expandido a lo largo de miles de millones de años. Esto separa las galaxias entre sí y estira las longitudes de onda de la luz a medida que se mueve entre ellas.



su luz parece más roja, mientras que la otra se acerca a la Tierra y su luz parece más azul.

El universo en expansión

A medida que la tecnología mejoró, se aplicaron técnicas espectrográficas a muchos otros objetos astronómicos, incluidas “nebulosas” misteriosas y borrosas. Algunas de ellas resultaron ser enormes nubes de gas interestelar, que emitían toda su luz en longitudes de onda específicas, similares a las que emiten los vapores en el laboratorio. Pero otros emitieron luz en un continuo (una amplia franja de luz de todos los colores) con algunas líneas oscuras, lo que sugiere que estaban formados por una gran cantidad de estrellas. Estas se conocieron como “nebulosas espirales” debido a su forma de espiral.

A partir de 1912, el astrónomo estadounidense Vesto Slipher comenzó a analizar los espectros de nebulosas espirales distantes y descubrió que la mayoría de ellas tenían importantes desplazamientos Doppler hacia el extremo rojo del espectro. Esto demostró que se alejaban de la Tierra a altas velocidades, independientemente de en qué parte del cielo fueran vistos. Algunos astrónomos tomó esto como evidencia de que las nebulosas espirales eran galaxias vastas e independientes, ubicadas mucho más allá del alcance gravitacional de la Vía Láctea. Sin embargo, no fue hasta 1925 que el astrónomo estadounidense Edwin Hubble calculó la distancia a las nebulosas espirales midiendo el brillo de las estrellas dentro de ellas.

Hubble comenzó a medir los cambios Doppler de las galaxias y en 1929 había descubierto un patrón: cuanto más se aleja una galaxia de la Tierra, más rápido se aleja. Esta relación, ahora conocida como ley de Hubble pero predicha por primera vez en 1922 por el físico ruso Alexander Friedmann, se interpreta mejor como un efecto de la expansión del universo en su conjunto.

Este llamado corrimiento al rojo "cosmológico" no es el resultado del efecto Doppler como lo habría entendido Doppler. En cambio, el espacio en expansión separa las galaxias, como pasas en una masa para pastel que se eleva.

Nombrado en honor a Edwin Hubble, el Telescopio Espacial Hubble se ha utilizado para descubrir estrellas distantes, medir sus desplazamientos al rojo y estimar la edad del universo en 13.800 millones de años.

cocineros. La tasa de expansión es la misma pequeña cantidad por cada año luz de espacio, pero se acumula en la inmensidad del universo hasta que las galaxias se separan a una velocidad cercana a la de la luz y las longitudes de onda de la luz se extienden hasta el rojo lejano y más allá. luz visible, hacia el infrarrojo: extremo del espectro. La relación entre la distancia y el corrimiento al rojo (denotadoZ) es tan directo que los astrónomos usanZ, no años luz, para indicar la distancia de los objetos más lejanos del universo.

Aplicaciones prácticas

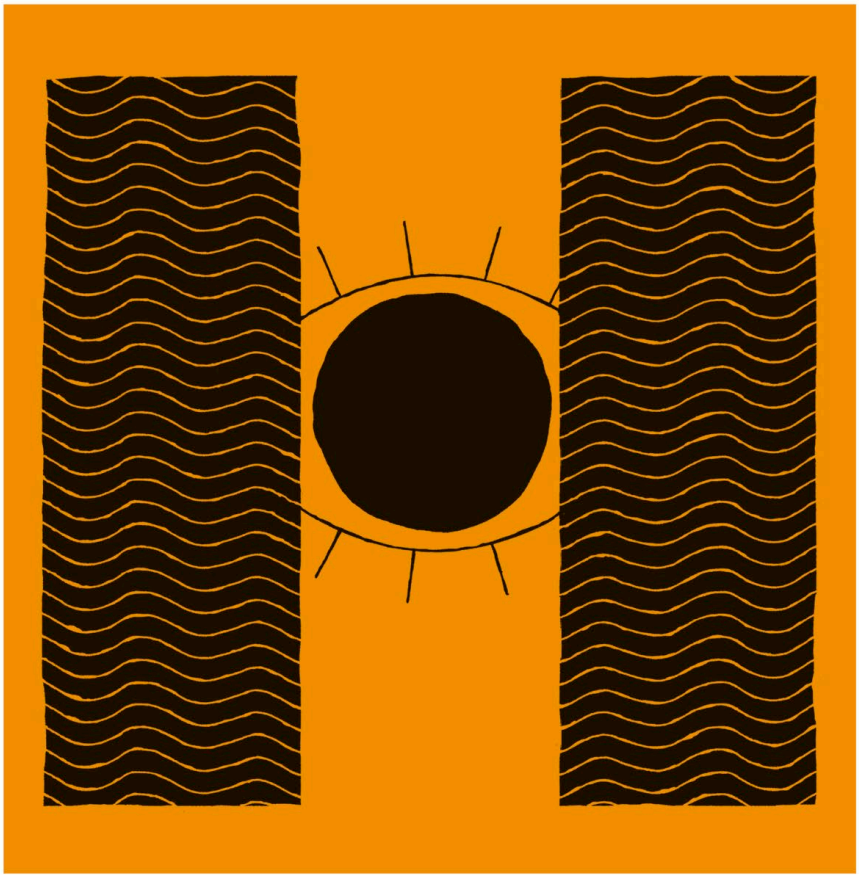
El descubrimiento del Doppler ha tenido muchas aplicaciones tecnológicas. El radar Doppler (utilizado en “pistolas de radar” de control de tráfico y aplicaciones de seguridad aérea) revela la distancia y la velocidad relativa de un objeto que refleja una ráfaga de ondas de radio. También puede rastrear lluvias intensas calculando la velocidad de la precipitación. Los sistemas de navegación por satélite GPS deben tener en cuenta el desplazamiento Doppler de las señales de los satélites para poder calcular con precisión la posición de una unidad receptora en relación con las órbitas de los satélites. También pueden utilizar esta información para realizar mediciones precisas del propio movimiento de la unidad receptora.

ESTOS MISTERIOSO

OLAS NOSOTROS

NO PUEDEN VER

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Heinrich Hertz(1857–1894),
Wilhelm Röntgen
(1845-1923)

ANTES
1672 Isaac Newton divide la luz blanca en un espectro usando un prisma y luego la recombina.

1803 Thomas Young sugiere que los colores de la luz visible son causados por rayos de diferentes longitudes de onda.

DESPUÉS
C. 1894 El ingeniero italiano Guglielmo Marconi logra la primera comunicación a larga distancia utilizando ondas de radio.

1906inventor americano Reginald Fessenden utiliza un sistema de "modulación de amplitud" para realizar la primera transmisión de radio.

En 1865, James Clerk Maxwell interpretó la luz como una onda electromagnética en movimiento con campos eléctricos y magnéticos transversales: ondas sincronizadas en ángulo recto entre sí (como se muestra en la imagen opuesta). La teoría de Maxwell hizo que los científicos plantearan más preguntas. ¿Hasta qué punto se extendía el "espectro electromagnético" más allá del rango visible para el ojo humano? ¿Y qué propiedades podrían distinguir ondas con longitudes de onda mucho más largas o más cortas que la luz visible?

Primeros descubrimientos
El astrónomo alemán William Herschel encontró la primera evidencia de la existencia de radiación más allá

Ver también: Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142–147 · Luz grumosa y ondulada 176–179 Difracción e interferencia 180–183 · Polarización 184–187 Ver más allá de la luz 202–203 · Rayos nucleares 238–239

Heinrich Hertz

Nacido en Hamburgo, Alemania, en 1857, Heinrich Hertz estudió ciencias e ingeniería en Dresde, Munich y Berlín, con físicos eminentes como Gustav Kirchhoff y Hermann von Helmholtz. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Berlín en 1880.

Hertz se convirtió en profesor titular de física en la Universidad de Karlsruhe en 1885. Aquí llevó a cabo experimentos innovadores para generar ondas de radio. También contribuyó al descubrimiento del efecto fotoeléctrico (la emisión de electrones cuando la luz incide sobre un material) y realizó un importante trabajo investigando la forma en que se transfieren las fuerzas entre cuerpos sólidos en contacto. La creciente reputación de Hertz le llevó a ser nombrado director del Instituto de Física de Bonn en 1889. Tres años más tarde, a Hertz le diagnosticaron una rara enfermedad de los vasos sanguíneos y murió en 1894.

Trabajos clave

1893 *Ondas eléctricas*
1899 *Principios de la mecánica*

el rango de luz visible en 1800. Mientras medía las temperaturas asociadas con los diferentes colores (visibles) de la luz solar, Herschel permitió que el espectro de luz que estaba proyectando en un termómetro se desplazara más allá de la luz roja visible. Se sorprendió al descubrir que la lectura de temperatura se había disparado, una señal de que gran parte del calor de la radiación solar es transportado por rayos invisibles.

En 1801, el farmacéutico alemán Johann Ritter presentó evidencia de lo que llamó "rayos químicos". El experimento de Ritter implicó estudiar el comportamiento del cloruro de plata, una sustancia química sensible a la luz, que era relativamente inactiva cuando se exponía a la luz roja, pero se oscurecía con la luz azul. Ritter demostró que exponer la sustancia química a radiación más allá del violeta en el espectro visible (ahora conocida como radiación "ultravioleta") producía una reacción de oscurecimiento aún más rápida.

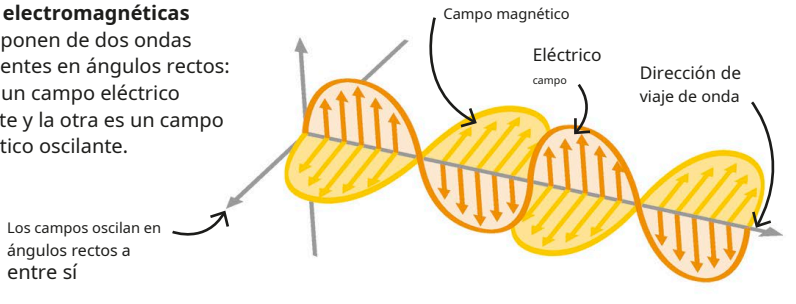
Maxwell publicó su modelo de luz como una onda electromagnética que se autorefuerza (se sostiene a sí misma continuamente). Maxwell's Las teorías vinculaban la longitud de onda y el color con las ondas electromagnéticas, lo que significaba que su modelo también podía aplicarse a los rayos infrarrojos y ultravioleta (con longitudes de onda más cortas o más largas que las del espectro visible), permitiendo que los rayos ultravioleta e infrarrojos fueran tratados como extensiones naturales de la luz. espectro visible.

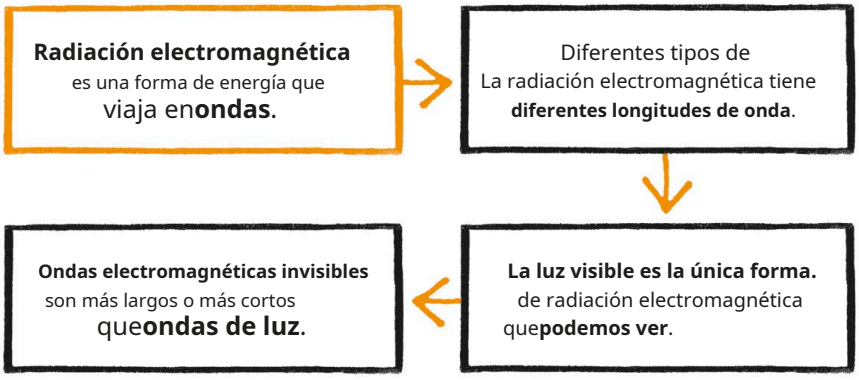
Encontrar pruebas

Las ideas de Maxwell seguían siendo teóricas, ya que en ese momento no existían tecnologías adecuadas para probarlas. Sin embargo, todavía era capaz de predecir fenómenos que estarían asociados con su modelo de luz, como la existencia de ondas con longitudes de onda radicalmente diferentes. La mayoría de los científicos concluyeron que la mejor manera de probar el modelo de Maxwell sería buscar evidencia de estos fenómenos predichos.

Heinrich Hertz, en 1886, experimentó con un circuito eléctrico que constaba de dos cables conductores separados en espiral colocados uno cerca del otro. Ambos extremos de cada cable terminaban en una bola de metal, y cuando se aplicaba corriente a uno de los cables, saltaba una chispa entre los terminales de bola de metal del otro. El efecto fue un ejemplo de inducción electromagnética, con los cables enrollados en espiral actuando como "bobinas de inducción".

Ondas electromagnéticas se componen de dos ondas coincidentes en ángulos rectos: una es un campo eléctrico oscilante y la otra es un campo magnético oscilante.





La corriente que fluía en un cable enrollado generó un campo magnético que hizo que la corriente fluyera en el otro, pero cuando Hertz estudió este experimento más de cerca, formuló una idea para un circuito que podría probar las teorías de Maxwell.

El circuito de Hertz, completado en 1888, tenía un par de cables largos uno hacia el otro con una pequeña "chispa" entre sus extremos. El otro extremo de cada cable estaba unido a su propia esfera de zinc de 30 cm (12 pulgadas). Al hacer pasar corriente a través de una "bobina de inducción" cercana, se inducen chispas a través del espacio de chispa, creando una alta diferencia de voltaje entre los dos extremos de cada cable y una corriente eléctrica.

que oscilaba rápidamente de un lado a otro. Con cuidadosos ajustes de las corrientes y voltajes, Hertz pudo "sintonizar" su circuito a una frecuencia de oscilación de alrededor de 50 millones de ciclos por segundo.

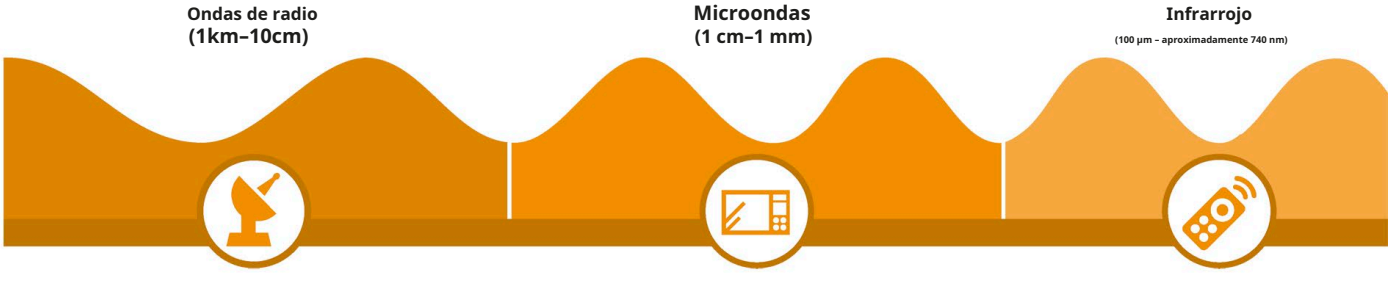
Según la teoría de Maxwell, esta corriente oscilante produciría ondas electromagnéticas con longitudes de onda de unos pocos pies, que podrían detectarse a distancia. El elemento final del experimento de Hertz fue un "receptor" (que recibiría las señales de onda): se trataba de un rectángulo separado de alambre de cobre con su propio explosor, montado a cierta distancia del circuito principal. Hertz descubrió que cuando la corriente fluyó en la bobina de inducción del circuito, provocó chispas en el explosor de ese circuito principal, y también en el explosor del receptor. El receptor estaba mucho más allá del alcance de cualquier posible efecto de inducción, por lo que algo más tenía que estar causando que la corriente oscilara en su interior: las ondas electromagnéticas.

Hertz llevó a cabo una variedad de pruebas adicionales para demostrar que efectivamente había producido ondas electromagnéticas similares a la luz, como demostrar que las ondas viajaban a la velocidad de la luz. Publicó sus resultados ampliamente.

Sintonizando la radio

Otros físicos e inventores pronto comenzaron a investigar estas "ondas hertzianas" (más tarde llamadas ondas de radio) y encontraron innumerables aplicaciones. A medida que la tecnología mejoró, también lo hizo el alcance y la calidad de las señales, y la capacidad de transmitir muchos flujos diferentes de ondas de radio desde un solo mástil. A la telegrafía inalámbrica (señales simples transmitidas como código Morse) le siguió la comunicación por voz y, finalmente, la televisión. Las ondas de radio de Hertz siguen desempeñando un papel vital en la tecnología moderna.

El espectro electromagnético



antenas parabólicas
puede capturar radio olas para ayudar astrónomos detectar estrellas.

Hornos de microondas
calentar alimentos usando microondas para hacer las moleculas de agua dentro de la comida vibra.

Un mando a distancia
controlenvía señales a un televisión usando ondas infrarrojas.

Cuando las comunicaciones por radio se hicieron realidad, se descubrió otro tipo diferente de radiación electromagnética. En 1895, el ingeniero alemán Wilhelm Röntgen estaba experimentando con las propiedades de los rayos catódicos. Se trata de corrientes de electrones que se observan en tubos de vacío, que se emiten desde un cátodo (el electrodo conectado al terminal negativo de una fuente de voltaje) y luego se liberan dentro de un tubo de descarga (un recipiente de vidrio con un voltaje muy alto entre sus extremos). Para evitar posibles efectos de la luz sobre el tubo, Röntgen lo envolvió en cartón. Un fluorescente cercano

> He visto
> ¡mi muerte!
> **Anna Röntgen**
> **al ver la primera imagen de rayos X que revela los huesos de su mano**

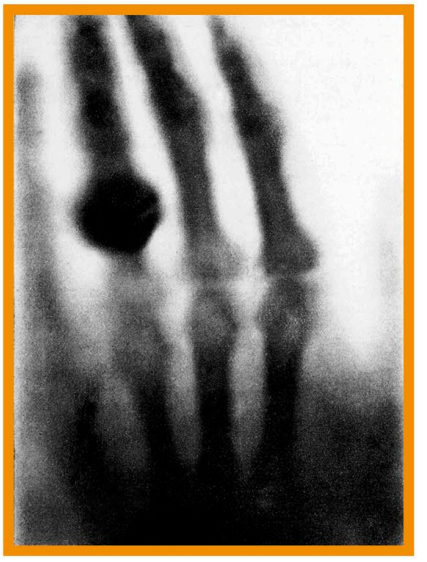
La primera imagen de rayos X. La fotografía jamás tomada se debe a la silueta de la mano de Anna Bertha Röntgen en una placa fotográfica, en 1895. Su anillo de bodas es visible en su dedo anular.

La pantalla del detector brillaba durante sus experimentos, y esto se debía a rayos desconocidos que se emitían desde el interior del tubo y que atravesaban directamente la carcasa de cartón.

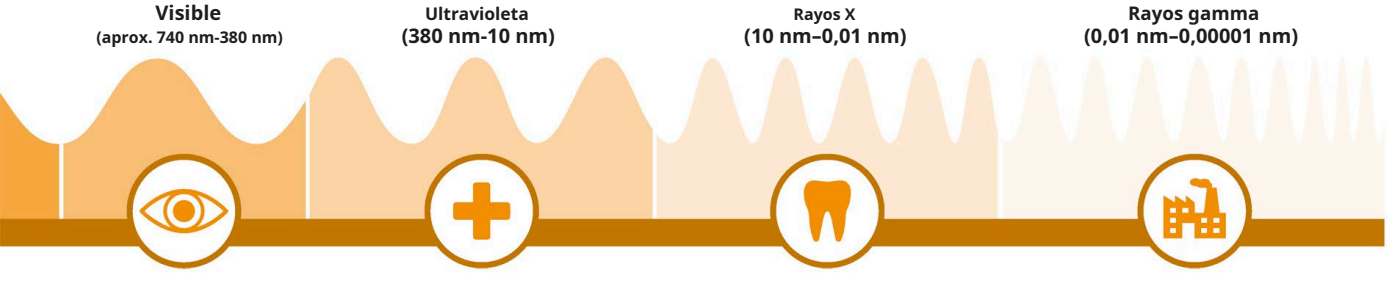
imágenes de rayos X

Las pruebas revelaron que los nuevos rayos de Röntgen (a los que llamó rayos "X", indicando su naturaleza desconocida) también podrían afectar a las películas fotográficas, lo que significa que podría registrar permanentemente su comportamiento. Llevó a cabo experimentos para probar qué tipos de material atravesarían los rayos y descubrió que estaban bloqueados por metal. Röntgen le pidió a su esposa, Anna, que colocara su mano sobre una placa fotográfica mientras él le dirigía los rayos X; Descubrió que los huesos bloqueaban los rayos, pero los tejidos blandos no.

Los científicos e inventores se apresuraron a desarrollar nuevas aplicaciones para las imágenes de rayos X. A principios del siglo XX, los efectos dañinos de los rayos X



Se notó una sobreexposición en tejido vivo y gradualmente se introdujeron medidas para limitar la exposición. Esto también incluyó el regreso a las fotografías de rayos X que requerían sólo una breve ráfaga de rayos. La verdadera naturaleza de los rayos X se debatió hasta 1912, cuando Max von Laue utilizó cristales para difractar con éxito los rayos X (la difracción ocurre cuando cualquier onda encuentra un obstáculo). Esto demostró que los rayos X eran ondas y una forma de alta energía de radiación electromagnética.



el ojo humano
Sólo puedo ver este corto alcance del campo electromagnético. espectro.

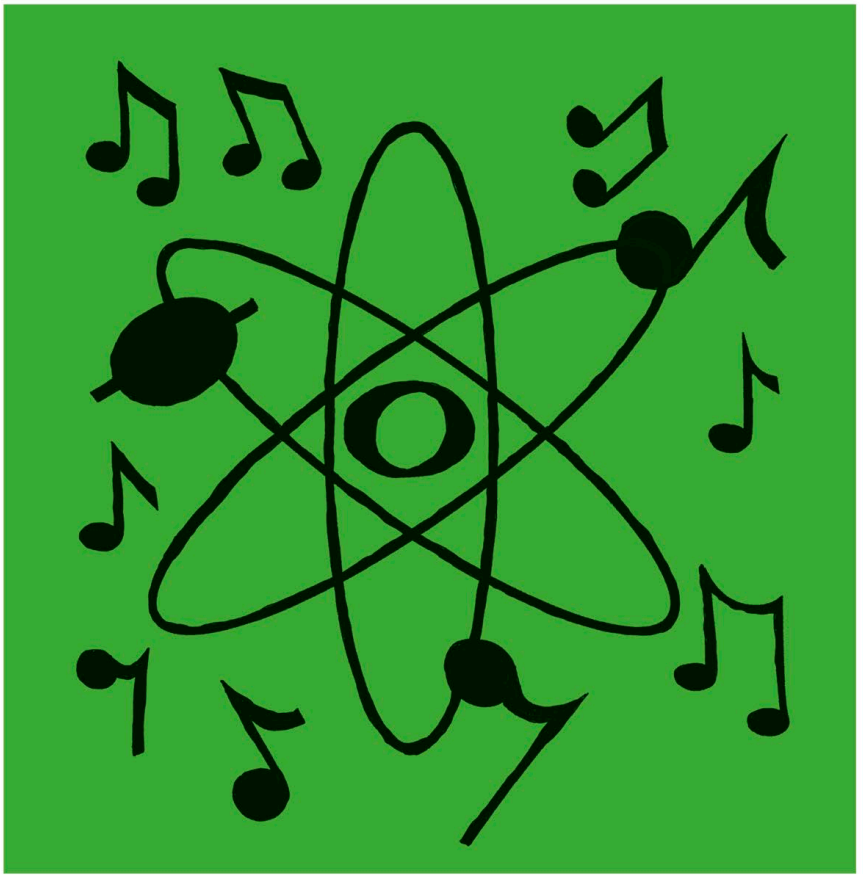
Desinfecciónpuede ser llevado a cabo utilizando algunas longitudes de onda de luz ultravioleta para matar bacterias.

pase de rayos x a través del tejido para revelar el dientes o huesos debajo.

La energía nuclear estacionesutilizar el energía de gamma radiación para generar electricidad.

EL IDIOMA DE ESPECTROS ES UNA VERDADERA MÚSICA DE LAS ESFERAS

LUZ DEL ÁTOMO



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Niels Bohr(1885-1962)

ANTES
1565 En España, Nicolás Monardes describe la Propiedades fluorescentes de una infusión de madera de riñón.

1669 Hennig Brand, un químico alemán, descubre el fósforo, que brilla en la oscuridad tras ser iluminado.

DESPUÉS
1926 El físico austriaco Erwin Schrödinger demuestra que las órbitas de los electrones se parecen más a nubes borrosas que a trayectorias circulares.

1953 En los EE.UU., Charles Townes utiliza estimulación emisión de electrones movimientos para crear un amplificador de microondas, demostrando el principio que presagia el láser.

La capacidad de los materiales para generar luz en lugar de simplemente reflejarla desde fuentes luminosas como el sol se consideró inicialmente con cierta curiosidad. Sin embargo, con el tiempo resultó esencial para comprender la estructura atómica de la materia y, en el siglo XX, condujo al desarrollo de nuevas tecnologías valiosas.

Descubriendo la fluorescencia

Se registraron sustancias con la capacidad natural de brillar en determinadas condiciones al menos desde el siglo XVI, pero los científicos no intentaron investigar esto. fenómeno hasta principios del siglo XIX. En 1819, un clérigo inglés y

Ver también: Potencial eléctrico 128–129 · Ondas electromagnéticas 192-195 Cuantos de energía 208–211 · Partículas y ondas 212–215 · Matrices y ondas 218–219 El núcleo 240–241 · Partículas subatómicas 242–243

algunos minerales son fluorescentes. Al igual que esta fluorita, absorben ciertos tipos de luz, como la ultravioleta, y luego la liberan en una longitud de onda diferente, cambiando su color percibido.

El mineralogista Edward Clarke describió las propiedades del mineral espato flúor (ahora más conocido como fluorita), que brilla en determinadas circunstancias.

En 1852, el físico irlandés George Gabriel Stokes demostró que el brillo del mineral era causado por la exposición a la luz ultravioleta, mientras que la luz emitida se limitaba a un solo color azul y longitud de onda, apareciendo como una línea cuando se dividía en un espectro. Sostuvo que el espato flúor transformaba la luz ultravioleta de longitud de onda más corta directamente en luz visible al estirar de alguna manera su

longitud de onda y acuñó el término "fluorescencia" para describir este comportamiento particular.

Mientras tanto, los primeros experimentadores eléctricos habían descubierto otra forma de crear materia luminosa. Cuando intentaron pasar corriente eléctrica entre electrodos metálicos en cada extremo de un tubo de vidrio al que se le había eliminado la mayor cantidad de aire posible, el gas fino que quedaba entre los electrodos comenzó a brillar cuando la diferencia de voltaje entre los electrodos era lo suficientemente alta. Trabajando con Michael Faraday, Stokes, explicó el fenómeno en términos de que los átomos de gas se energizan, permitiendo que la corriente fluya a través de ellos y luego liberando luz a medida que desprenden su energía.

Unos años más tarde, el soplador de vidrio alemán Heinrich Geissler inventó una nueva forma de crear vacíos mucho mejores en recipientes de vidrio. Al agregar gases específicos al vacío, descubrió que podía hacer que una lámpara brillara en varios colores. Este descubrimiento está detrás de la invención de las luces fluorescentes, que se generalizaron en el siglo XX.

Emisiones elementales

La razón por la que algunos átomos producen luz siguió siendo un misterio hasta finales de la década de 1850, cuando el químico alemán Robert Bunsen y el físico Gustav Kirchhoff unieron fuerzas para investigar el fenómeno. Se centraron en los colores generados cuando
Se calentaron diferentes elementos a temperaturas incandescentes en la llama abrasadora del quemador de gas de laboratorio recientemente inventado por Bunsen. Descubrieron que la luz producida no era una mezcla continua de diferentes longitudes de onda y colores (como la luz solar o la luz de las estrellas), sino una mezcla de unas pocas líneas brillantes emitidas con longitudes de onda y colores muy específicos (líneas de emisión).

El patrón preciso de emisiones era diferente para cada elemento y, por lo tanto, era único. "huella digital" química. En 1860 y 1861, Bunsen y Kirchhoff identificaron dos nuevos elementos, el cesio y el rubidio, sólo a partir de sus líneas de emisión.

El avance de Balmer

A pesar del éxito del método de Kirchhoff y Bunsen, todavía tenían que explicar por qué las líneas de emisión se producían en longitudes de onda específicas. Sin embargo, se dieron cuenta de que tenía algo que ver con las propiedades de los átomos en los elementos individuales. Este era un concepto nuevo. En ese momento, generalmente se pensaba que los átomos eran partículas sólidas e indivisibles de un elemento particular, por lo que era difícil imaginar un proceso interno que generara luz o alterara las longitudes de onda de las líneas de emisión.

En 1885 se produjo un avance importante, cuando el matemático suizo Johann Jakob Balmer identificó un patrón en la serie de líneas de emisión creadas por el hidrógeno. Las longitudes de onda, que hasta entonces parecían una colección aleatoria de
líneas, podría predecirse mediante una fórmula matemática que involucra-

> Un químico que es no soy fisico no es nada en absoluto.
>
> **Roberto Bunsen**

> Tenemos un conocimiento íntimo de los constituyentes. de... átomos individuales.
>
> **Niels Bohr**

dos series de números enteros. Las líneas de emisión vinculadas con valores más altos de uno o ambos números solo se generaron en entornos de temperatura más alta.

La fórmula de Balmer, llamada serie de Balmer, demostró inmediatamente su valor cuando se identificaron las líneas de absorción de alta energía asociadas con el hidrógeno en las longitudes de onda previstas en el espectro del sol y otras estrellas. En 1888, el físico sueco Johannes Rydberg desarrolló una versión más generalizada de la fórmula, denominada posteriormente fórmula de Rydberg, que podría usarse (con algunos ajustes) para predecir líneas de emisión de muchos elementos diferentes.

Pistas del átomo

En la década de 1890 y principios del siglo XX se produjeron importantes avances en la comprensión de los átomos. Surgió evidencia de que los átomos no eran los trozos de materia sólidos y uniformes que antes se suponía. Primero, en 1897, JJ Thomson descubrió el electrón (la primera partícula subatómica), y luego en 1909, basándose en el trabajo de Hans Geiger.

y Ernest Marsden, Ernest Rutherford descubrió el núcleo, en el que se concentra la mayor parte de la masa de un átomo. Rutherford imaginó el átomo con un pequeño núcleo central rodeado de electrones dispersos al azar por el resto del volumen.

Las conversaciones con Rutherford inspiraron al joven científico danés, Niels Bohr, a trabajar en su propio modelo atómico. El avance de Bohr residió en combinar el modelo nuclear de Rutherford con la sugerencia radical de Max Planck, en 1900, de que, en circunstancias particulares, la radiación se emitía en trozos del tamaño de un bocado llamados cuantos. Planck había sugerido esta teoría como un medio matemático para explicar la emisión luminosa característica de las estrellas y otros objetos incandescentes. En 1905, Albert Einstein había ido un paso más allá que Planck, sugiriendo que estos pequeños estallidos de radiación electromagnética no eran simplemente una consecuencia de ciertos tipos de emisión de radiación, sino que eran fundamentales para la naturaleza de la luz.

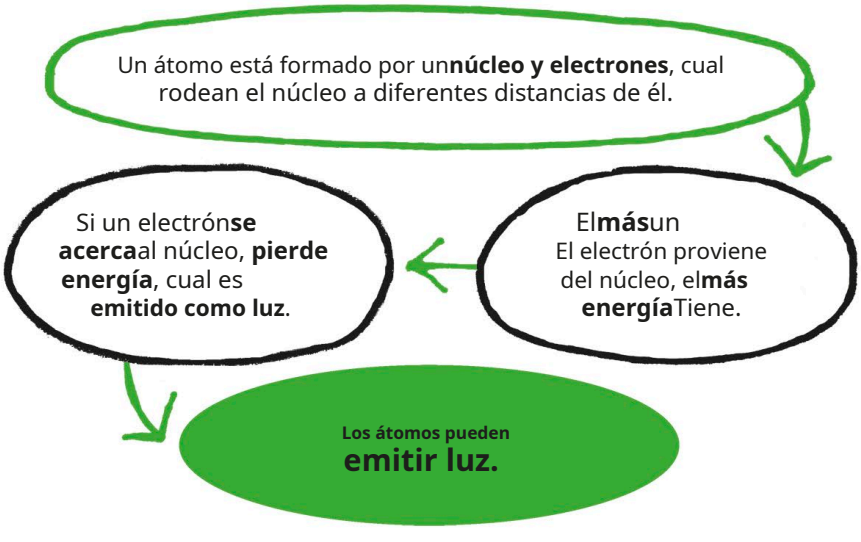
En ese momento, Bohr no aceptaba la teoría de Einstein de que la luz siempre viajaba en ráfagas llamadas fotones, pero sí se preguntaba si algo sobre la estructura atómica, y en particular la disposición de los electrones, podría

A veces producen luz en pequeñas ráfagas de longitud de onda y energía específicas.

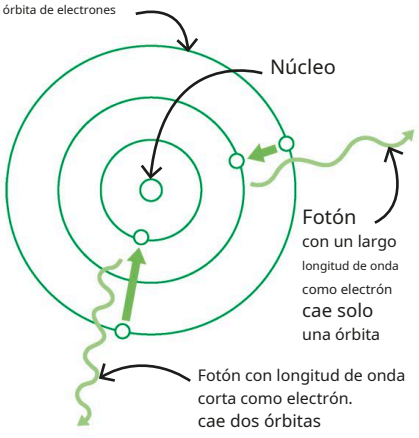
El modelo de Bohr.

En 1913, Bohr encontró por primera vez una manera de vincular la estructura atómica con la fórmula de Rydberg. En una influyente trilogía de artículos, sugirió que el movimiento de los electrones en un átomo estaba restringido de modo que sólo podían tener ciertos valores de momento angular (el momento debido a su órbita alrededor del núcleo). En la práctica esto significó que Los electrones sólo podían orbitar a ciertas distancias fijas del núcleo. Porque la fuerza del La atracción electromagnética entre el núcleo con carga positiva y los electrones con carga negativa también variaría, dependiendo de la órbita del electrón, se podría decir que cada electrón tiene una determinada energía, con órbitas de menor energía cercanas al núcleo y otras de mayor energía más alejadas.

Cada órbita podía contener un número máximo de electrones, y las órbitas cercanas al núcleo se "llenaban" primero. Espacios vacíos



Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com



La longitud de onda de la luz.que emite un átomo depende de cuánta energía pierde un electrón al caer de una órbita a otra. Cuanto más cae, más corta es la longitud de onda de la luz y mayor es su energía.

(y órbitas enteras vacías) más alejadas estaban disponibles para que los electrones que estaban más cerca "saltaran" si recibían un impulso de energía, de un rayo de luz entrante, por ejemplo. Si permaneciera un espacio en la órbita más cercana, la transición normalmente sería breve y el electrón "excitado" volvería casi inmediatamente al estado de menor energía.
En este caso, emitiría un pequeño estallido de luz cuya frecuencia, longitud de onda y color estarían determinados por la ecuación $\Delta mi=h$ norte (llamada ecuación de Planck, en honor a Max Planck), dondeΔmies la diferencia de energía en la transición, norte (la letra griega nu) es la frecuencia de la luz emitida, y $h$es la constante de Planck, que relaciona la frecuencia y la energía de las ondas electromagnéticas.

Bohr aplicó de manera convincente este nuevo modelo al átomo más simple, el hidrógeno, y mostró cómo podía producir las conocidas líneas de la serie de Balmer. Sin embargo, la prueba más convincente que confirmaba que estaba en la derecha

La pista venía con una explicación para una serie de líneas en el espectro de estrellas súper calientes, conocida como la serie Pickering. Bohr explicó correctamente que estas líneas estaban asociadas con electrones que saltaban entre órbitas en helio ionizado (He^+): átomos de helio a los que ya se les había despojado de uno de sus dos electrones.

Raíces del láser

Las décadas siguientes demostraron que el modelo de Bohr era una simplificación excesiva de los extraños procesos cuánticos que ocurren dentro de los átomos reales, pero aun así marcó un gran paso adelante en el conocimiento científico. El modelo de Bohr no sólo explicó por primera vez el vínculo entre la estructura atómica y las líneas espectrales, sino que también allanó el camino para nuevas tecnologías que aprovecharían esta emisión, como el láser, un intenso haz de fotones creado al desencadenar una cascada. de eventos de emisión dentro de un material energizado. El comportamiento en el que se basa el láser fue predicho por Einstein ya en 1917 y Rudolf W. Ladenburg demostró su existencia en 1928, pero no se logró en la práctica un rayo láser funcional hasta 1960.

> “Debemos tener claro que cuando se trata de átomos, el lenguaje sólo puede usarse como en la poesía.”
>
> **Niels Bohr**

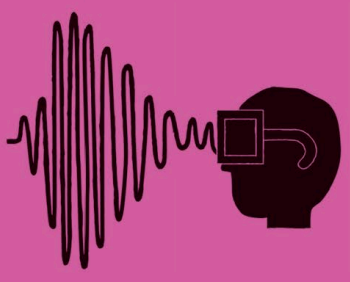
Niels Bohr

Nacido en Copenhague, Dinamarca, en 1885, Bohr estudió física en la universidad de la ciudad. Su tesis doctoral, completada en 1911, fue una investigación innovadora sobre la distribución de electrones en los metales. Ese mismo año, una visita a laboratorios británicos inspiró a Bohr a formular el modelo de estructura atómica, por el que recibió el Premio Nobel de Física en 1922. En aquella época era director del nuevo Instituto Danés de Física Teórica.

En 1940 Dinamarca fue ocupada por los nazis. Tres años más tarde, Bohr, cuya madre era judía, huyó a Estados Unidos, donde contribuyó al Proyecto Manhattan para construir una bomba atómica. Al regresar a Dinamarca en 1945, ayudó a establecer la Agencia Internacional de Energía Atómica. Bohr murió en su casa de Copenhague en 1962.

Trabajos clave

1913“Sobre la constitución de átomos y moléculas” **1924**“La teoría cuántica de la radiación”
1939“El mecanismo de la fisión nuclear”



VIDENTE CON SONIDO

PIEZOELECTRICIDAD Y ULTRASONIDO

EN CONTEXTO

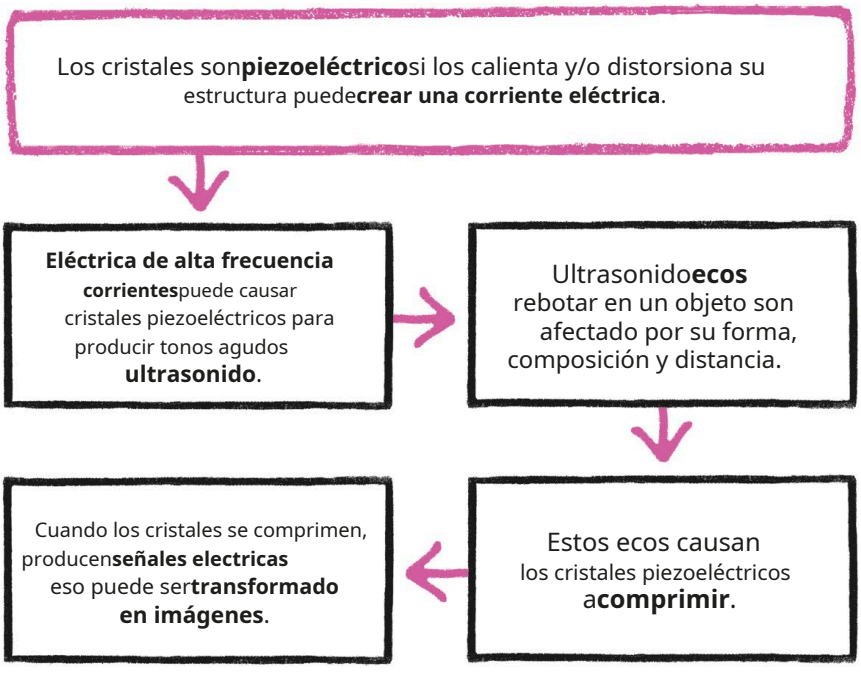
FIGURAS CLAVES
Pierre Curie(1859-1906),
Jacques Curie(1855-1941),
Paul Langevin(1872-1946)

ANTES
1794 El biólogo italiano Lazzaro Spallanzani revela cómo los murciélagos navegan escuchando los ecos de sus propios llamados.

DESPUÉS
1941 En Austria, Karl Dussik es el primero en aplicar la ecografía al cuerpo humano.

1949 John Wild, médico estadounidense, es pionero en el uso de la ecografía como herramienta de diagnóstico.

1966 En la Universidad de Washington, Donald Baker y sus colegas desarrollan el primer ultrasonido de onda pulsada que tiene en cuenta el efecto Doppler, cuando la fuente de ondas sonoras se mueve para medir el movimiento de los fluidos corporales.



Ud. canta ecolocalización—el de ección de objetos ocultos m nt a percepción de las ondas sonoras reflejadas por esos objetos como ecos fue propuesta por primera vez en 1912 por el físico británico Lewis Fry Richardson. Poco después del RMS *Titánico* desastre de ese año, Richardson solicitó una patente sobre un método para advertir a los barcos sobre icebergs y otros grandes objetos sumergidos o semisumergidos. Richardson señaló que un barco que emitiera ondas sonoras con frecuencias más altas y longitudes de onda más cortas (más tarde llamadas ultrasonido) podría detectar objetos sumergidos con mayor precisión que la permitida por las ondas sonoras normales. Él

Ver también: Potencial eléctrico 128–129 · Música 164–167 El efecto Doppler y corrimiento al rojo 188-191 Aplicaciones cuánticas 226–231

> La absorción de El sonido del agua es menor. que por aire. **Lewis Richardson**

Imaginó un medio mecánico para producir tales ondas y demostró que se propagarían más lejos en el agua que en el aire.

cristales de curie

El invento de Richardson nunca se hizo realidad. El RMS *Titánico* El desastre desapareció del foco de atención y la necesidad se volvió menos urgente. Además, gracias al trabajo de los hermanos franceses Jacques y Pierre Curie ya se había descubierto un medio más práctico para crear y detectar ultrasonidos.

Alrededor de 1880, mientras investigaban la forma en que ciertos cristales pueden crear una corriente eléctrica cuando se calientan, descubrieron que el uso de presión para deformar la estructura cristalina también creaba una diferencia de potencial eléctrico, llamada piezoelectricidad. Un año después, confirmaron una predicción hecha por el físico francés Gabriel Lippmann de que pasar una corriente eléctrica a través de un cristal causaría un efecto inverso: físico.

deformación del cristal.

Las aplicaciones prácticas de la piezoelectricidad no se descubrieron de inmediato, pero Paul Langevin, antiguo alumno de Pierre Curie, siguió investigando. Con el estallido de la Primera Guerra Mundial y la aparición de una nueva forma de guerra, el submarino alemán, Langevin se dio cuenta de que la piezoelectricidad podía utilizarse para producir y detectar ultrasonidos.

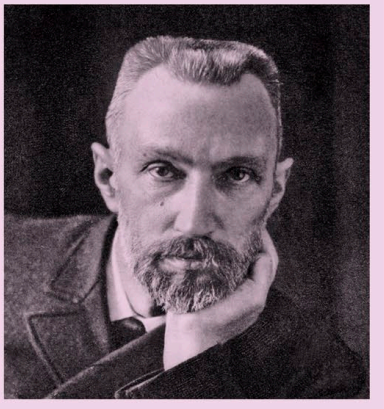
Nueva tecnología

Se podrían impulsar pulsos de ondas sonoras de alta frecuencia al agua utilizando poderosas corrientes oscilantes que atraviesan pilas de cristales intercalados entre láminas de metal, en un dispositivo llamado transductor. El principio inverso podría convertir la compresión causada por los ecos que regresan en una señal eléctrica. La aplicación que hizo Langevin del descubrimiento de los hermanos Curie constituye la base del sonar y otros sistemas de ecolocalización que todavía se utilizan en la actualidad.

Al principio, la interpretación de los datos de ecolocalización implicaba convertir el pulso de retorno en sonido a través de un altavoz, pero a principios del siglo XX se desarrollaron pantallas electrónicas. Estos eventualmente evolucionaron hasta convertirse en los sistemas de visualización de sonar utilizados en la navegación,

defensa y ecografía médica.

En cristales piezoeléctricos Como la amatista, la estructura de las células no es simétrica. Cuando se aplica presión, la estructura se deforma y los átomos se mueven, creando un pequeño voltaje.



Pierre Curie

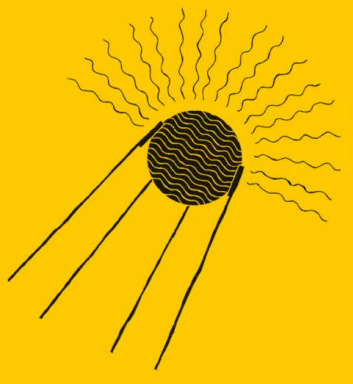
Hijo de un médico, Curie nació en París en 1859 y fue educado por su padre. Después de estudiar matemáticas en la Universidad de París, trabajó como instructor de laboratorio en la facultad de ciencias de la universidad. Los experimentos que realizó en el laboratorio con su hermano Jacques llevaron al descubrimiento de la piezoelectricidad y a la invención de un "electrómetro" para medir las débiles corrientes eléctricas involucradas.

Para su doctorado, Curie investigó la relación entre temperatura y magnetismo. A través de esto, comenzó a trabajar con la física polaca Maria Skłodowska, con quien se casó en 1895.

Pasaron el resto de sus vidas investigando la radiactividad, lo que les llevó a ganar el premio Nobel en 1903. Pierre murió en un accidente de tráfico en 1906.

Obra clave

1880"Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinée" ("Desarrollo de electricidad mediante presión sobre las caras inclinadas de cristales hemiédricos")



UN GRAN FLUCTUANDO ECO

VER MÁS ALLÁ DE LA LUZ

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Jocelyn Bell Burnell(1943–)

ANTES

1800 En el Reino Unido, William Herschel accidentalmente descubre la existencia de radiación infrarroja.

1887 Heinrich Hertz genera con éxito ondas de radio por primera vez.

DESPUÉS

1967 Los satélites militares estadounidenses Vela, diseñados para detectar pruebas nucleares, registran los primeros estallidos de rayos gamma procedentes de acontecimientos violentos en el universo distante.

1983 La NASA, el Reino Unido y los Países Bajos lanzan el primer telescopio espacial infrarrojo, IRAS (Infrared Astronomical Satellite).

2019 Utilizando la síntesis de apertura para construir una colaboración de telescopios de todo el mundo, los astrónomos observan la radiación alrededor de un agujero negro supermasivo en una galaxia distante.

PAG El descubrimiento de las radiaciones electromagnéticas más allá de la luz visible por parte de los físicos en el siglo XIX y principios del XX introdujo nuevas formas de observar la naturaleza y el universo. Tuvieron que superar muchos desafíos en su búsqueda, particularmente desde que

Ondas de radio invisibles desde el espacio penetrar Atmósfera terrestre.

↓

Radiotelescopiospoder recoger ondas de radio para identificar sus **ubicación aproximada**.

↓

Esto ayuda a los astrónomos localizar**estrellas distantes y galaxias**.

La atmósfera terrestre bloquea o inunda muchas de estas radiaciones. En el caso de las ondas de radio de planetas, estrellas y otros fenómenos celestes (que pueden penetrar la atmósfera), el principal problema eran sus enormes longitudes de onda, que dificultaban localizar su fuente.

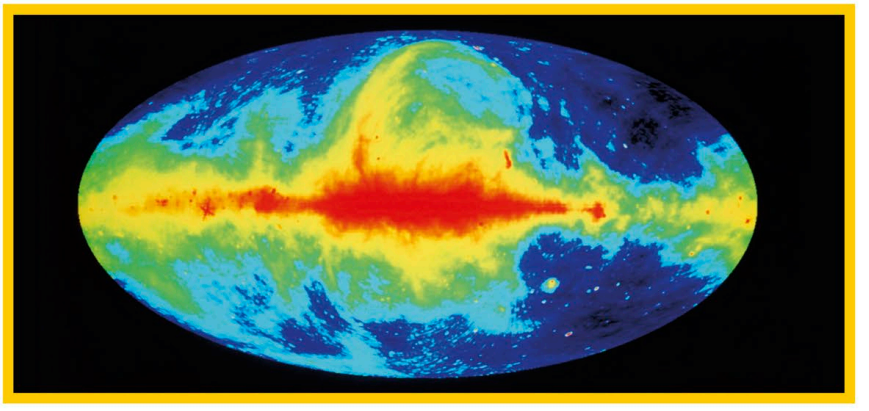
Los primeros pasos en la radioastronomía se dieron en 1931, cuando el físico estadounidense Karl Jansky instaló una gran antena sensible sobre una plataforma giratoria. Al medir cómo cambiaban las señales a lo largo del día a medida que la Tierra giraba, revelando diferentes partes del cielo sobre el horizonte, pudo demostrar que el centro de la Vía Láctea era una fuerte fuente de ondas de radio.

Mapeo de ondas de radio

En la década de 1950, Bernard Lovell construyó el primer telescopio gigante de "plato" en el Reino Unido en Jodrell Bank en Cheshire. Con un diámetro de 76,2 m (250 pies), el telescopio pudo producir imágenes borrosas del cielo radioeléctrico, precisando por primera vez la ubicación y la forma de fuentes de radio individuales.

En la década de 1960 se lograron mejoras significativas en el poder de resolución de los radiotelescopios,

Ver también: Ondas electromagnéticas 192–195 306–307 Ondas gravitacionales 312–315 · Agujeros negros y agujeros de gusano 286–289 Materia oscura 302–305 · Energía oscura



mapas de radiodel cielo muestran el origen de las ondas que llegan desde el espacio profundo. Las emisiones de radio más intensas (rojo) provienen de las regiones centrales de nuestra Vía Láctea.

el trabajo de Martin Ryle, Antony Hewish y la estudiante de posgrado Jocelyn Bell Burnell de la Universidad de Cambridge. Ryle inventó una técnica llamada síntesis de apertura, en la que una rejilla o "conjunto" de antenas de radio individuales funciona como un único telescopio gigante. El principio detrás de esto implicaba medir la amplitud (fuerza) variable de las ondas de radio entrantes recibidas por las diferentes antenas en el mismo momento.

Este método, y algunas suposiciones básicas sobre la forma de las ondas de radio, permitieron calcular la dirección de su fuente con mucha mayor precisión.

Utilizando el descubrimiento de Ryle, Hewish y Bell Burnell se propusieron construir un radiotelescopio con varios miles de antenas, que finalmente cubriría 4 acres (1,6 ha) de terreno. Hewish esperaba utilizar este telescopio para descubrir el centelleo interplanetario (IPS): variaciones predichas en las señales de radio de fuentes distantes cuando interactúan con el campo magnético y el viento solar.

El proyecto de Bell Burnell implicó monitorear las mediciones del telescopio IPS y buscar las variaciones ocasionales que se predecían. Entre sus hallazgos, sin embargo, se encontraba una señal de radio mucho más corta y predecible, que duraba 1/25 de segundo y se repetía cada 1,3 segundos, manteniendo el ritmo del movimiento de las estrellas. Al final resultó ser un púlsar, el primer ejemplo conocido de una estrella de neutrones que gira rápidamente, un objeto cuya existencia se había propuesto por primera vez en la década de 1930.

El descubrimiento de los púlsares por parte de Bell Burnell fue el primero de muchos avances en la radioastronomía. A medida que la tecnología mejorara, la síntesis de apertura se utilizaría para crear imágenes cada vez más detalladas del cielo de radio, lo que ayudaría a revelar la estructura de la Vía Láctea, las galaxias distantes en colisión y el material que rodea los agujeros negros supermasivos.

Jocelyn Bell Burnell

Nacida en Belfast, Irlanda del Norte, en 1943, Jocelyn Bell se interesó por la astronomía después de visitar el Planetario de Armagh cuando era niña. Se licenció en física en la Universidad de Glasgow en 1965 y se trasladó a la Universidad de Cambridge para realizar un doctorado con Antony Hewish. Fue aquí donde descubrió el primer púlsar.

A pesar de figurar como la segunda autora del artículo que anunció el descubrimiento, Bell Burnell fue pasada por alto cuando sus colegas recibieron el Premio Nobel en 1974. Desde entonces, ha continuó una carrera de gran éxito en astronomía y recibió varios otros premios, incluido el Premio Especial Avance en Física Fundamental 2018, tanto por su investigación científica como por su trabajo para promover el papel de las mujeres y las minorías en la ciencia y la tecnología.

Obra clave

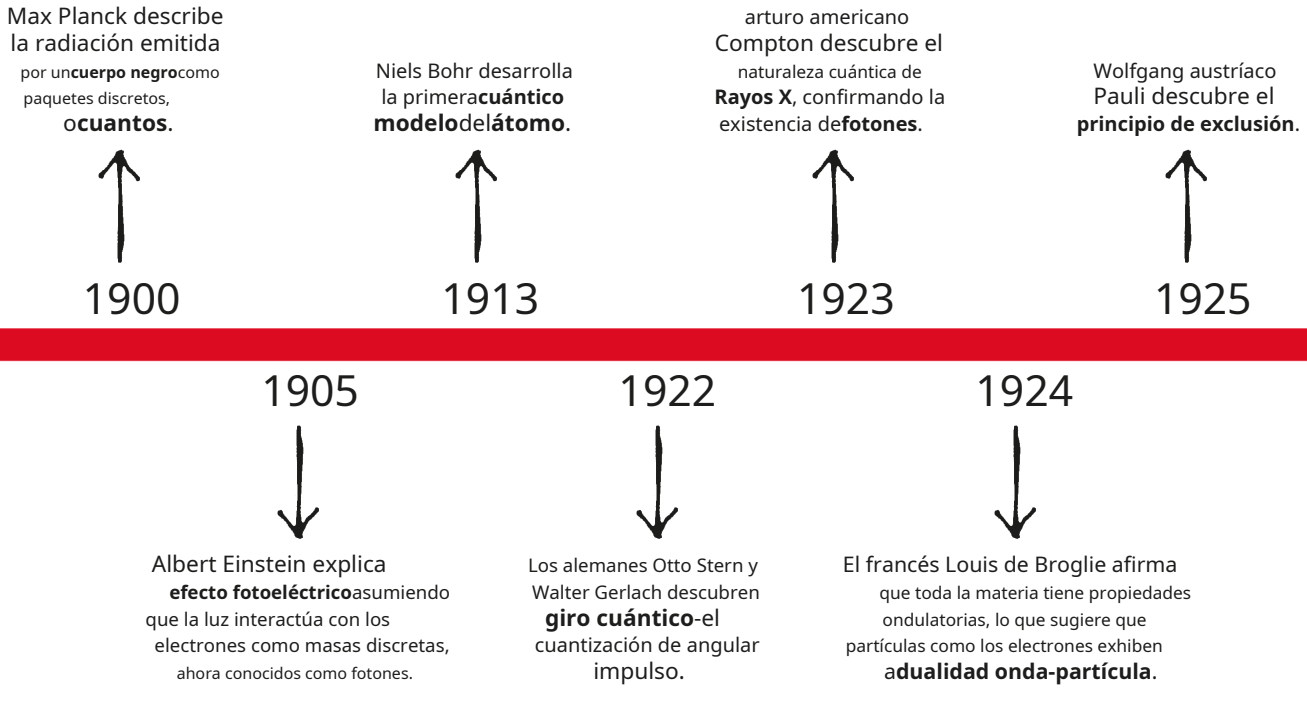
1968 "Observación de una fuente de radio que pulsa rápidamente" (*Naturaleza*papel, con Antony Hewish y otros)

LA QAN

MUNDO

nuestro incierto
universo

tum



Nuestro mundo es determinista y sigue leyes que establecen definitivamente cómo evolucionará un sistema. Por lo general, a través del ensayo (como practicar deportes y predecir la trayectoria de una pelota) y el error (ser golpeado por unas cuantas pelotas), aprendemos de forma innata estas leyes deterministas para situaciones cotidianas específicas.

Los físicos diseñan experimentos para descubrir estas leyes y así permitirnos predecir cómo nuestro mundo o las cosas que contiene cambiarán con el tiempo. Estos experimentos han conducido a la física determinista de la que hemos hablado en el libro hasta este momento. Sin embargo, a principios del siglo XX resultó desconcertante descubrir que en el fondo la naturaleza no se comporta así. El mundo determinista que vemos cada día es sólo una imagen borrosa, un promedio, de un mundo mucho más inquietante. mundo que existe en las escalas más pequeñas. Nuestra puerta a este nuevo reino se abrió al descubrir que la luz se comporta de maneras desconocidas.

¿Ondas o partículas?

Desde el siglo XVI había un intenso debate sobre la naturaleza de la luz. Un bando afirmó que la luz estaba formada por partículas diminutas, una idea defendida por el físico inglés Isaac Newton, pero otros veían la luz como un fenómeno ondulatorio. En 1803, el experimento de la doble rendija del físico británico Thomas Young pareció proporcionar evidencia definitiva de la luz ondulatoria, ya que se vio que exhibía interferencia, un comportamiento que no podía explicarse por las partículas. En los primeros años del siglo XX, los físicos alemanes Max Planck y Albert Einstein revisaron las ideas de Newton. y sugirió que la luz debía fabricarse a partir de masas discretas. Einstein tuvo que invocar esta conclusión aparentemente extraña para describir el fenómeno observado del efecto fotoeléctrico.

Ahora había pruebas para ambos lados del debate entre partículas y ondas. Algo muy sospechoso estaba sucediendo: bienvenido al mundo de los cuantos, objetos que se comportan como partículas y como ondas, dependiendo de la situación. La mayoría de los cuantos son partículas subatómicas elementales o fundamentales, no compuestas de otras partículas. Cuando se miran, parecen partículas, pero entre observaciones se comportan como si fueran ondas. El comportamiento ondulatorio no es como el del agua. Si dos ondas se combinan para formar una ola más grande, esto no aumenta la energía de una

1926
alemán max nacido da el**probabilidad interpretación**de mecánica cuántica.

1927
Niels Bohr campeones el**Copenhague interpretación**de el estado cuántico de una partícula.

1927
Werner Heisenberg descubre el **principio de incertidumbre** después de desarrollar un**mecanica matricial** interpretación de Teoría cuántica.

1935
Erwin austriaco Schrödinger propone su famoso "**gato en una caja**" pensamiento experimento.

1964
John Bell propone su teorema para determinar cuantitativamente sondear el mecanismo detrás**cuántico enredo**.

1981
Ricardo americano Feynman propone la idea de**cuántico informática**.

1985
El británico David Deutsch publica un artículo exponiendo sus ideas para**universal computadora cuántica**.

2019
El sistema IBM Q Uno**cuántico computadora**es lanzado.

cuántica como lo sería una onda de agua. En cambio, aumenta la probabilidad de que se vea una ola en ese lugar en particular. Cuando miramos un cuanto, no puede estar en todas las ubicaciones al mismo tiempo; en cambio, decide una única ubicación dependiendo de las probabilidades delineadas por su onda.

Se trataba de una forma nueva y probabilística de comportarse, en la que podíamos saber todo acerca de un cuanto en un momento dado pero nunca poder predecir definitivamente dónde estaría más adelante. Estos cuantos no se comportan como balones deportivos, cuyo vuelo es predecible; siempre existe la probabilidad de que, dondequiera que estemos, nos golpeen.

El mecanismo por el cual los objetos cuánticos pasan de un comportamiento ondulatorio a mediciones similares a partículas ha sido objeto de intensos debates. En 1927, el físico danés Niels Bohr defendió la interpretación de Copenhague de la física cuántica. Esta serie de ideas sostiene que la función de onda representa probabilidades de resultados finales y se colapsa en un solo resultado posible cuando la mide un observador.
Desde entonces ha seguido una colección de interpretaciones más complicadas. Y todavía el debate continúa.

Nada es seguro

No es ahí donde termina la extrañeza. Nunca se puede saber realmente todo sobre un cuanto. El físico alemán Werner.
El principio de incertidumbre de Heisenberg explica que es imposible conocer ciertos pares de propiedades, como el momento y la posición, con precisión exacta. Cuanto más exactamente midas una propiedad, menos exactamente conocerás la otra.

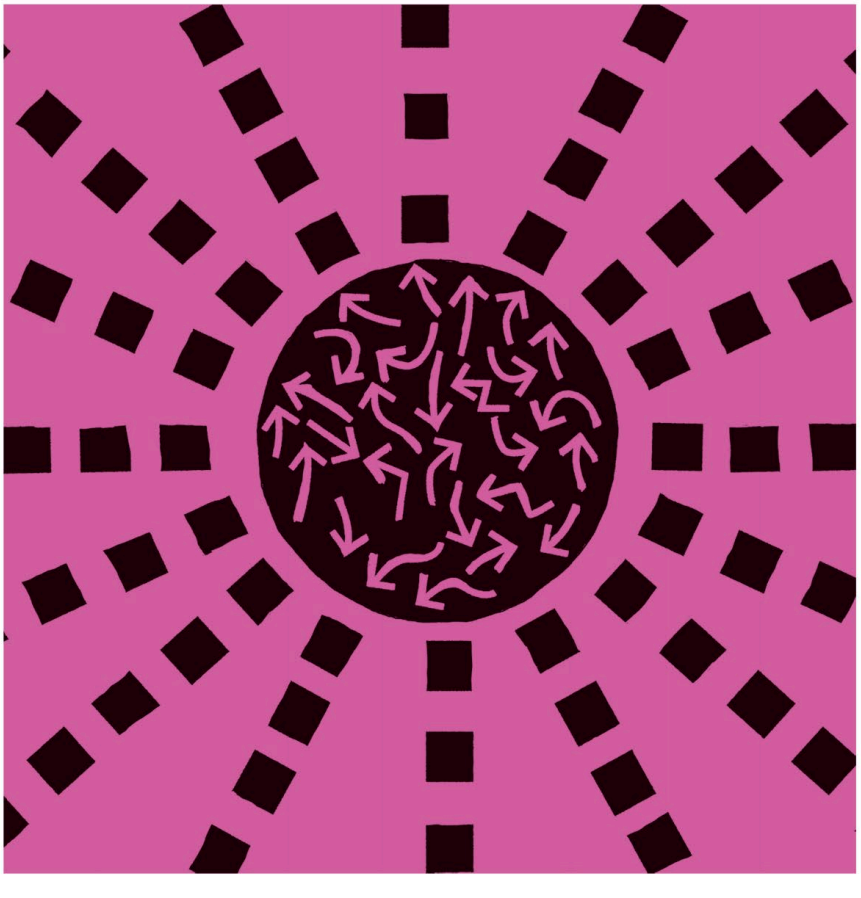
Aún más extraño es el fenómeno de la cuántica. entrelazamiento, que permite que una partícula afecte a otra en un lugar completamente diferente. Cuando dos partículas se entrelazan, incluso si están separadas por una gran distancia, en realidad son un solo sistema. En 1964, el físico norirlandés John Stewart Bell presentó pruebas de que el entrelazamiento cuántico realmente existía, y el físico francés Alain Aspect demostró esta "acción a distancia" en 1981.

Hoy, estamos aprendiendo cómo utilizar estos extraños comportamientos cuánticos para hacer cosas fantásticas. La nueva tecnología que utiliza principios cuánticos cambiará el mundo en un futuro próximo.

LA ENERGÍA DE LA LUZ SE DISTRIBUYE DISCONTINUAMENTE

EN EL ESPACIO

CANTIDAD DE ENERGÍA



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Max Planck(1858-1947)

ANTES
1839físico francés Edmond Becquerel hace la primera observación del efecto fotoeléctrico.

1899físico británico
JJ Thomson confirma que la luz ultravioleta puede generar electrones a partir de una placa de metal.

DESPUÉS
1923 El físico estadounidense Arthur Compton logra dispersar rayos X de los electrones, demostrando que actúan como partículas.

1929químico americano
Gilbert Lewis acuña el nombre de "fotones" para los cuantos de luz.

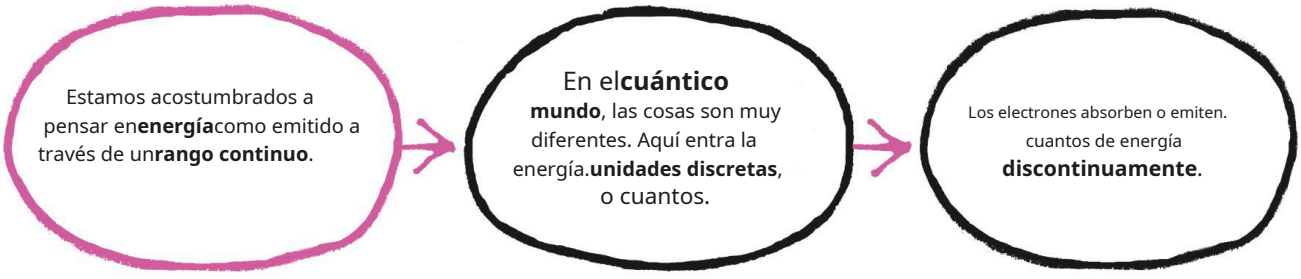
1954 Los científicos estadounidenses que trabajan en los Laboratorios Bell inventan la primera célula solar práctica.

oh

El 19 de octubre de 1900, Max Planck dio una conferencia ante el físico alemán. Sociedad (Deutsche Physikalische Gesellschaft) en Berlín. Aunque pasarían algunos años antes de que todas las implicaciones de sus pronunciamientos se hicieran evidentes, marcaron el comienzo de una nueva era para la física: la era de lo cuántico.

Planck presentó una solución a un problema que había desconcertado a los físicos hasta entonces. El problema involucraba cuerpos negros, objetos que son perfectos absorbentes y emisores de todas las frecuencias de radiación electromagnética. Un cuerpo negro se llama así porque toda la radiación que incide sobre su superficie es

Ver también: Radiación térmica 112–117 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Difracción e interferencia 180–183 · Ondas electromagnéticas 192-195 · Luz del átomo 196–199 · Partículas y ondas 212–215



absorbido; no se refleja ninguna radiación y la energía que emite depende únicamente de su temperatura. Los cuerpos negros perfectos no existen en la naturaleza.

Una teoría formulada por los físicos británicos James Jeans y John Strutt, Lord Rayleigh, explicaba con precisión el comportamiento de cuerpos negros en bajas frecuencias, pero predijo que, como efectivamente no había un límite superior para las frecuencias más altas que podían generarse, la cantidad de energía irradiada por un cuerpo negro debería continuar aumentando infinitamente. Esto fue denominado la "catástrofe ultravioleta", ya que se trataba de radiación de longitud de onda corta más allá del ultravioleta. La observación diaria muestra que la predicción es errónea. Si fuera correcto, los panaderos estarían expuestos a dosis letales de radiación cada vez que abrieran sus hornos. Pero a finales del siglo XIX nadie podía explicar por qué estaba mal.

Planck hizo la suposición radical de que los átomos que vibran en un cuerpo negro emiten energía en paquetes discretos, a los que llamó cuantos. El tamaño de estos cuantos es proporcional a la frecuencia de vibración. Aunque en teoría existe un número infinito de frecuencias más altas, se necesitan cantidades cada vez mayores de energía para liberar cuantos en esos niveles. Por ejemplo, un cuanto de luz violeta tiene el doble de frecuencia y, por tanto, el doble de energía que un cuanto de luz roja. Esta proporcionalidad explica por qué un cuerpo negro no emite energía por igual en todo el espectro electromagnético.

constante de Planck

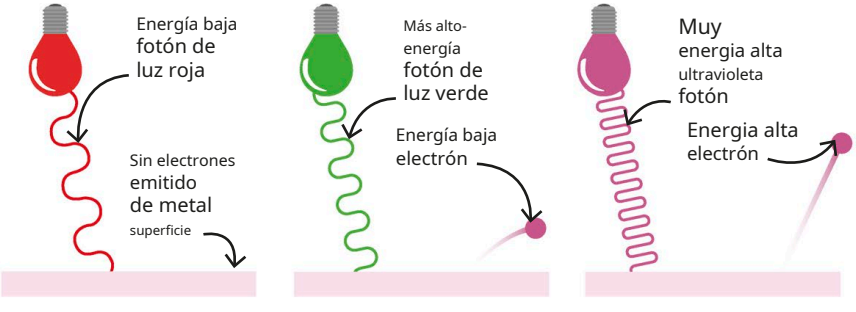
Planck denota la constante de proporcionalidad como h—ahora conocida como constante de Planck—y relacionó la energía de un cuanto con su frecuencia mediante la sencilla fórmula $mi=hv$, dónde mi es igual a energía y v es igual a la frecuencia. La energía de un cuanto se puede calcular multiplicando su frecuencia por la constante de Planck, que es $6,62607015 - 10^{-34}$ J s (julios-segundos).

La solución de Planck funcionó: los resultados de los experimentos estaban de acuerdo con las predicciones hechas por su teoría. Sin embargo, Planck no estaba del todo satisfecho y se resistió durante años a la idea de que sus cuantos tuvieran alguna base en la realidad, considerándolos más bien como una "solución" matemática para un problema difícil. No podía dar ninguna buena razón por la que los cuantos deberían ser ciertos y, según admitió él mismo, los había introducido como "un acto de desesperación", pero condujo a la revolución cuántica que transformó la física.

El efecto fotoeléctrico

Cuando Albert Einstein escuchó acerca de la teoría de Planck, comentó: "Era como si el suelo hubiera sido-

El efecto fotoeléctrico Es la emisión de electrones por parte de algunos metales cuando son impactados por un haz de luz. Cuanto mayor es la frecuencia de la luz, mayor energía tiene los fotones y mayor la energía de los electrones emitidos.



Cargas eléctricaspueden acumularse en el exterior de naves espaciales como la SpaceX Dragon, a menos que se instalen sistemas para drenarlos.

El efecto fotoeléctrico en el espacio.

Cuando una nave espacial está expuesta a la luz solar prolongada en un lado, los fotones ultravioleta de alta energía, o cuantos de luz, que golpean su superficie metálica provocan la expulsión de un flujo constante de electrones. La pérdida de electrones hace que la nave espacial desarrolle una carga positiva en el lado iluminado por el sol, mientras que el otro lado, el sombreado, tiene una carga relativa negativa.

Sin conductores que impidan la acumulación de carga, la diferencia de carga en la superficie provocará una descarga eléctrica.

corriente fluya de un lado de la nave espacial al otro. A principios de la década de 1970, antes de que se tomaran medidas para contrarrestar este fenómeno, interrumpió los delicados circuitos de varios satélites en órbita terrestre, provocando incluso la pérdida total de un satélite militar en 1973. La tasa de pérdida de electrones depende del material de la superficie del nave espacial, el ángulo con el que inciden los rayos del sol y la cantidad de actividad solar,

incluidas las manchas solares.

Nos sacaron de encima". En 1904, Einstein le escribió a un amigo que había descubierto "de la forma más sencilla la relación entre el tamaño de los cuantos elementales... y las longitudes de onda de la radiación". Esta relación fue la respuesta a un aspecto curioso de la radiación que anteriormente había desafiado toda explicación. En 1887, el físico alemán Heinrich Hertz descubrió que ciertos tipos de metales emitían electrones cuando se les dirigía un haz de luz. Este "efecto fotoeléctrico" es similar al fenómeno aprovechado para su uso en las comunicaciones de fibra óptica (aunque las fibras ópticas están hechas de materiales semiconductores en lugar de metales).

Un problema con los electrones.

Al principio, los físicos supusieron que el campo eléctrico (una región del espacio donde hay carga eléctrica) que forma parte de la onda electromagnética proporciona la energía que los electrones necesitan para liberarse. Si ese fuera el caso, cuanto más brillante sea la luz, más energía deberían tener los electrones emitidos. Sin embargo, se descubrió que ese no era el caso. La energía de lo liberado.

Los electrones no dependen de la intensidad de la luz, sino de su frecuencia. Cambiar el haz a frecuencias más altas, del azul al violeta y más allá, produce electrones de mayor energía; un haz de luz roja de baja frecuencia, incluso si es deslumbrantemente brillante, no produce electrones. Es como si las ondas que se mueven rápidamente pudieran mover fácilmente la arena de una playa, pero una ola que se mueve lentamente, por grande que sea, la deja intacta. Además, si los electrones van a saltar, lo hacen de inmediato: no hay acumulación de energía. Esto no hizo

> No existe ninguna analogía física que podamos hacer para comprender lo que sucede dentro de los átomos. Los átomos se comportan como átomos, nada más.
>
> **John Gribbin**
> **escritor científico británico y astrofísico**

sentido hasta las revelaciones de Planck y Einstein. En marzo de 1905, Einstein publicó un artículo en el que tomaba los cuantos de Planck y los unía al efecto fotoeléctrico, en la revista mensual*Anales de la física*diario. Este artículo le valió finalmente el Premio Nobel en 1921. Einstein estaba particularmente interesado en las diferencias entre las teorías de partículas y las teorías de ondas. Comparó las fórmulas que describen la forma en que se comportan las partículas de un gas cuando se comprimen o se les permite expandirse con aquellas que describen cambios similares a medida que la radiación se propaga por el espacio.

Descubrió que ambos obedecen las mismas reglas y que las matemáticas que sustentan ambos fenómenos son las mismas. Esto le dio a Einstein una manera de calcular la energía de un cuanto de luz de una frecuencia particular; sus resultados coincidieron con los de Planck.

A partir de aquí, Einstein pasó a mostrar cómo el efecto fotoeléctrico podría explicarse por la existencia de cuantos de luz. Como había establecido Planck, la energía de un cuanto estaba determinada por su frecuencia. Si un solo cuanto transfiere su energía a un electrón, entonces cuanto mayor sea la energía del

> Teoría atómica y mecánica cuántica demostró que todo, incluso el espacio y el tiempo, existe en bits discretos: cuantos.
>
> **Víctor J. Stenger**
>
> **físico de partículas estadounidense**

cuántico, mayor será la energía del electrón emitido. Los fotones azules de alta energía, como se denominaron más tarde los cuantos de luz, tienen el peso suficiente para expulsar electrones; los fotones rojos simplemente no lo hicieron. Aumentar la intensidad de la luz produce una mayor cantidad de electrones, pero no crea otros más energéticos.

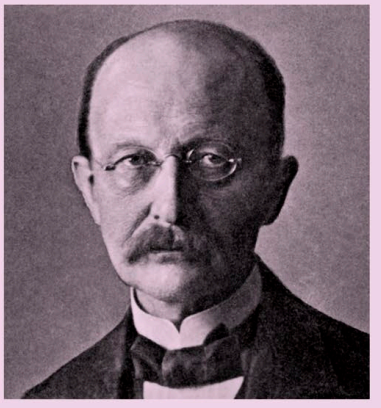
Más experimentos

Mientras que Planck había visto el cuanto como poco más que un dispositivo matemático, Einstein ahora sugería que se trataba de una realidad física real. Esto no les cayó bien a muchos otros físicos que se mostraban reacios a abandonar la idea de que la luz era una onda y no una corriente de partículas. En 1913, incluso Planck comentó sobre Einstein: "Que a veces... se haya excedido en sus especulaciones no debería reprochársele".

El escéptico físico estadounidense Robert Millikan realizó experimentos sobre el efecto fotoeléctrico que tenían como objetivo demostrar que la afirmación de Einstein era errónea, pero en realidad produjeron resultados totalmente en línea con la las predicciones de este último. Sin embargo, Millikan todavía hablaba de la "hipótesis audaz, por no decir imprudente" de Einstein. No fue hasta los experimentos realizados por el físico estadounidense Arthur Compton en 1923 que la teoría cuántica finalmente comenzó a ganar terreno.
aceptación. Compton observó la dispersión de los rayos X de los electrones y proporcionó evidencia plausible de que en experimentos de dispersión, la luz se comporta como una corriente de partículas y no puede explicarse puramente como un fenómeno ondulatorio. En su artículo, publicado en el*Revisión física*En la revista, explicó que "esta notable concordancia entre nuestras fórmulas y los experimentos puede dejar pocas dudas de que la dispersión de rayos X es un fenómeno cuántico".

La explicación de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico podía verificarse mediante experimentos: la luz, al parecer, actuaba como si fuera una corriente de partículas. Sin embargo, la luz también actuaba como una onda en fenómenos familiares y bien comprendidos como la reflexión, la refracción, la difracción y la interferencia. Entonces, para los físicos la pregunta seguía siendo: ¿qué era la luz? ¿Fue una onda o fue una partícula? ¿Podrían ser ambas cosas?

> Cada bribón cree que sabe [qué cuantos de luz son], pero él es engañándose a sí mismo.
>
> **Albert Einstein**



Max Planck

Nacido en Kiel, Alemania, en 1858, Max Planck estudió física en la Universidad de Munich, donde se graduó a los 17 años y obtuvo su doctorado cuatro años después. Desarrollando un gran interés por la termodinámica, en 1900 produjo lo que ahora se conoce como la fórmula de radiación de Planck, introduciendo la idea de cuantos de energía. Esto marcó el comienzo de la teoría cuántica, una de las piedras angulares de la física del siglo XX.
aunque sus consecuencias de largo alcance no fueron entendido desde hace varios años.

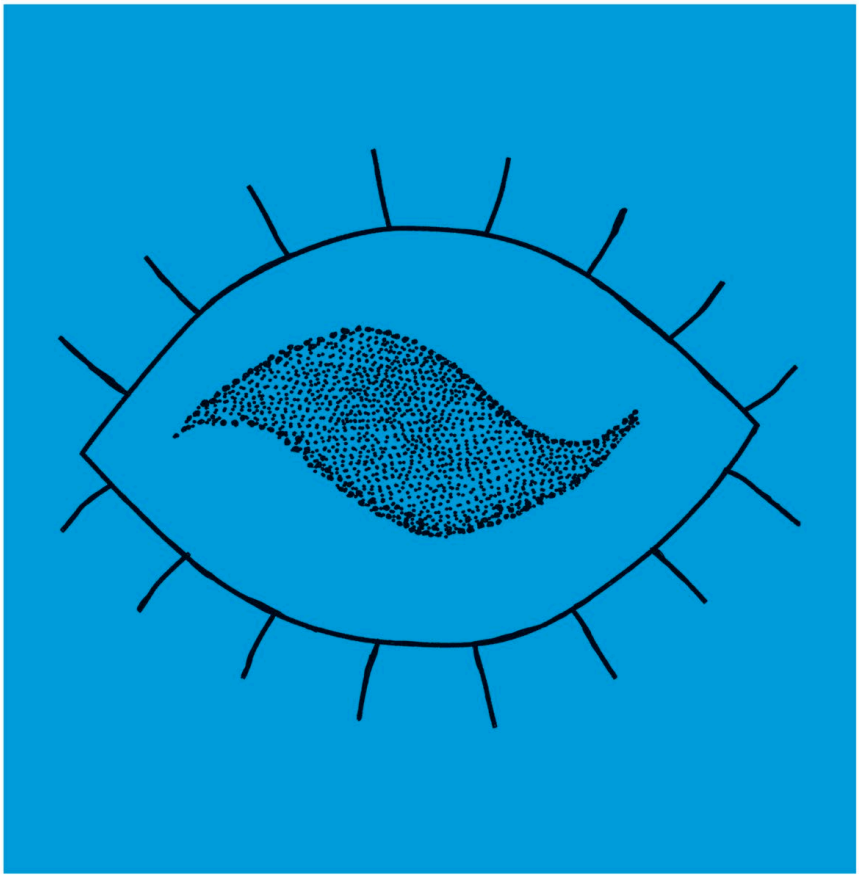
En 1918, Planck recibió el Premio Nobel de Física por su logro. Después de que Adolf Hitler llegó al poder en 1933, Planck suplicó en vano al dictador que abandonara sus políticas raciales. Murió en Göttingen, Alemania, en 1947.

Trabajos clave

1900"Sobre una mejora de la ecuación de Wien para el espectro"
1903*Tratado sobre Termodinámica*
1920*El origen y desarrollo de la Teoría cuántica*

ELLOS NO COMPORTARSE COMO CUALQUIER COSA QUE TIENES JAMAS VISTO

PARTÍCULAS Y ONDAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Luis de Broglie(1892-1987)

ANTES
1670 Isaac Newton desarrolla su teoría de la luz de corpúsculos (partículas).

1803 Thomas Young realiza su experimento de la doble rendija, demostrando que la luz se comporta como una ola.

1897 El físico británico JJ Thomson anuncia que La electricidad está formada por una corriente de partículas cargadas, ahora llamadas "electrones".

DESPUÉS
1926 El físico austriaco Erwin Schrödinger publica su ecuación de onda.

1927 El físico danés Niels Bohr desarrolla la interpretación de Copenhague, afirmando que una partícula existe en todos los estados posibles hasta que es observada.

La naturaleza de la luz se encuentra en el corazón de la física cuántica. La gente lo ha intentado durante siglos para explicar qué es. El antiguo pensador griego Aristóteles pensaba que la luz era una onda que viajaba a través de un éter invisible que llenaba el espacio. Otros pensaron que era una corriente de partículas demasiado pequeñas y que se movían rápidamente para ser percibido individualmente. en 55antes de Cristo, el filósofo romano Lucrecio escribió: “La luz y el calor del sol; están compuestos de átomos diminutos que, cuando son expulsados, no pierden tiempo en atravesar el espacio intermedio del aire”.

Sin embargo, la teoría de las partículas no encontró mucho apoyo y por eso, para el

Ver también: Radiación térmica 112–117 · Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142-147 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Difracción e interferencia 180–183 · Ondas electromagnéticas 192-195 · Cuantos de energía 208–211 · Números cuánticos 216–217

> La física no se trata sólo de escribir ecuaciones en una pizarra y sentado frente a una computadora. La ciencia se trata de explorando nuevos mundos.
>
> **Sebastián Suchitra**
> **físico indio**

Durante los siguientes 2.000 años o más, se aceptó generalmente que la luz viajaba en ondas.

Isaac Newton quedó fascinado por la luz y realizó muchos experimentos. Demostró, por ejemplo, que la luz blanca se podía dividir en un espectro de colores al pasarla a través de un prisma. Observó que la luz viaja en línea recta y que las sombras tienen bordes nítidos. Le parecía obvio que la luz era una corriente de partículas y no una onda.

El experimento de la doble rendija

El formidablemente talentoso científico británico Thomas Young teorizó que si la longitud de onda de la luz fuera lo suficientemente corta, parecería viajar en línea recta como si fuera una corriente de partículas. En 1803 puso a prueba su teoría.

Primero, hizo un pequeño agujero en la persiana de una ventana para proporcionar una fuente puntual de iluminación. A continuación, tomó un trozo de tabla y le hizo dos agujeros, colocados muy juntos. Colocó su tablero para que la luz que entra por el agujero de la persiana de la ventana pase a través de los orificios y llegue a una pantalla. Si Newton tenía razón y la luz era una corriente de partículas, entonces dos puntos de luz serían visibles en la pantalla donde las partículas viajaban a través de los agujeros. Pero eso no es lo que vio Young.

En lugar de dos puntos de luz discretos, vio una serie de bandas curvas de colores separadas por líneas oscuras, exactamente como se esperaría si la luz fuera una onda. El propio Young había investigado patrones de interferencia en ondas dos años antes. Él tuvo

Describió cómo el pico de una onda que se encuentra con el pico de otra se suma para formar una onda más alta.

pico, mientras que dos valles forman un valle más profundo. Si un valle y un pico coinciden, entonces se anulan entre sí. Desafortunadamente, los hallazgos de Young no fueron bien recibidos porque no estaban de acuerdo con la opinión del gran Isaac Newton de que la luz era transportada por una corriente de partículas.

Partículas de luz

En la década de 1860, el científico escocés James Clerk Maxwell declaró que la luz era una onda electromagnética. Una onda electromagnética está formada por dos ondas contiguas que viajan en la misma dirección pero en ángulo recto entre sí. Una de estas ondas es un campo magnético oscilante, la otra un campo eléctrico oscilante. Los dos

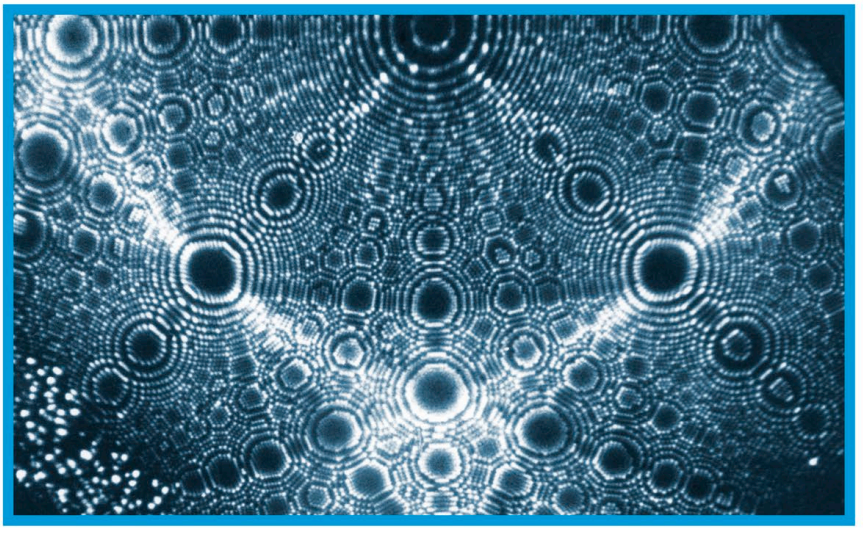
> Tenemos dos imágenes contradictorias de la realidad; por separado ninguno de ellos explica completamente los fenómenos de la luz, pero juntos lo hacen.
>
> **Albert Einstein**

Los campos se mantienen al paso entre sí a medida que avanza la onda. Cuando, en 1900, Max Planck resolvió el problema de la radiación del cuerpo negro suponiendo que la energía electromagnética se emitía en cuantos, en realidad no creía que fueran reales. La evidencia de que la luz era una onda era demasiado abrumadora para que Planck aceptara que en realidad estaba compuesta de partículas.

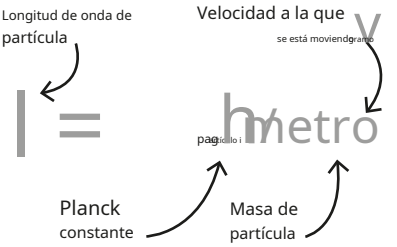
En 1905, Albert Einstein demostró cómo el efecto fotoeléctrico, que no podía explicarse mediante la teoría ondulatoria de la luz, podía explicarse mediante suponiendo que la luz estuviera realmente compuesta de fotones, o cuantos de energía discretos. En lo que a Einstein concernía, los cuantos de luz eran una realidad física, pero luchó sin éxito durante el resto de su vida por resolver la aparente paradoja de que la luz también era evidentemente ondulatoria. en un experimento Realizado en 1922, el físico estadounidense Arthur Compton logró dispersar los rayos X de los electrones. El pequeño cambio resultante en la frecuencia de los rayos X se conoció como efecto Compton y demostró que tanto los rayos X como los electrones actuaban como partículas cuando chocaban.

Simetría de la naturaleza

En 1924, Louis de Broglie propuso en su tesis doctoral la teoría de que toda la materia y la energía (no sólo la luz) tiene características tanto de partículas como de ondas. De Broglie creía intuitivamente en la simetría de la naturaleza y en la teoría cuántica de la luz de Einstein. Preguntó: si una onda puede comportarse como una partícula, ¿por qué una partícula como un electrón no puede comportarse también como una onda?



Esta imagen muestra el patrón de difracción de rayos X.para platino. Los rayos X son formas ondulatorias de energía electromagnética transportadas por partículas que transmiten luz llamadas "fotones". El experimento de difracción aquí muestra que los rayos X se comportan como rayos, pero un experimento diferente podría mostrarlos comportándose como partículas.



La ecuación de De Broglie de 1924se utiliza para calcular la longitud de onda de una partícula dividiendo la constante de Planck por el momento de la partícula (su masa multiplicada por su velocidad).

De Broglie considerado el famoso de Einstein$mi=mc_2$, que relaciona la masa con la energía, y el hecho de que Einstein y Planck habían relacionado la energía con la frecuencia de las ondas. Combinando los dos, de Broglie sugirió que la masa también debería tener forma de onda y se le ocurrió el concepto de onda de materia: cualquier objeto en movimiento tiene una onda asociada. La energía cinética de la partícula es proporcional a su frecuencia y la velocidad de la partícula es inversamente proporcional a su longitud de onda; las partículas más rápidas tienen longitudes de onda más cortas.

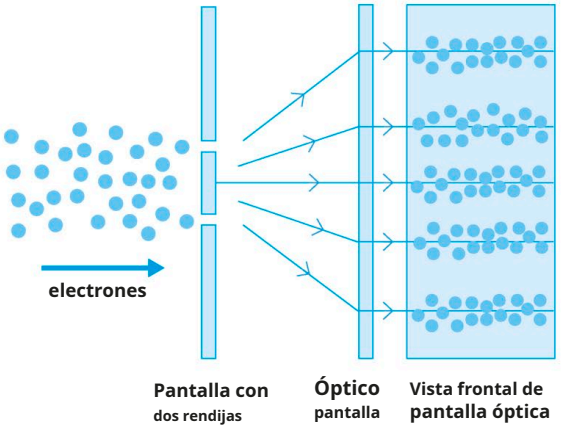
Einstein apoyó la idea de De Broglie porque parecía una continuación natural de sus propias teorías. La afirmación de De Broglie de que los electrones podían comportarse como ondas fue verificada experimentalmente en 1927, cuando el físico británico George Thomson y el físico estadounidense Clinton Davisson demostraron que

un estrecho haz de electrones dirigido a través de un fino cristal de níquel formó un patrón de difracción al pasar a través de la red cristalina.

¿Cómo puede ser así?

Thomas Young había demostrado que la luz era una onda mostrando cómo formaba patrones de interferencia. A principios de la década de 1960, el físico estadounidense Richard Feynman describió un experimento mental en el que imaginó lo que sucedería si se enviara un fotón o un electrón a la vez hacia rendijas gemelas que pudieran abrirse o cerrarse. El resultado esperado sería que los fotones viajaran como partículas, llegaran como partículas y fueran detectados en la pantalla como puntos individuales. En lugar de patrones de interferencia, debería haber dos áreas brillantes cuando ambas rendijas estuvieran abiertas, o solo una si una de las rendijas estuviera cerrada. Sin embargo, Feynman predijo un resultado alternativo: que el patrón en la pantalla se acumula, partícula por partícula, en patrones de interferencia cuando ambas rendijas están abiertas, pero no si una de ellas está cerrada.

Incluso si los fotones posteriores se disparan después de que los anteriores hayan llegado a la pantalla, de alguna manera todavía "saber" dónde ir para construir el patrón de interferencia. Es como si cada partícula viajara como una onda, atravesara ambas rendijas simultáneamente y creara interferencia consigo misma. Pero, ¿cómo sabe una sola partícula que viaja a través de la rendija de la izquierda si la rendija de la derecha está abierta o cerrada?



Cuando las partículas, como electrones o átomos, pasan a través de un aparato de doble rendija, patrones de interferencia Se producen bandas claras y oscuras, al igual que ocurre con las ondas. Esto muestra que Las partículas tienen propiedades ondulatorias y exhiben comportamiento ondulatorio.

Feynman desaconsejó incluso intentar responder estas preguntas. En 1964 escribió: "No sigas diciéndote a ti mismo, si es posible evitarlo, '¿Pero cómo puede ser así?' porque irás por el desagüe hacia un callejón sin salida del que todavía nadie ha escapado. Nadie sabe cómo puede ser así". Desde entonces, los hallazgos previstos por Feynman han sido confirmados por otros científicos.

Lo que es evidente es que tanto la teoría ondulatoria como la teoría partícula de la luz son correctas. La luz actúa como una onda cuando viaja por el espacio, pero como una partícula cuando se mide. No existe un modelo único que pueda describir la luz en todos sus aspectos. Es bastante fácil decir que la luz tiene "dualidad onda-partícula" y dejarlo así, pero lo que esa afirmación realmente significa es algo que nadie puede responder satisfactoriamente.

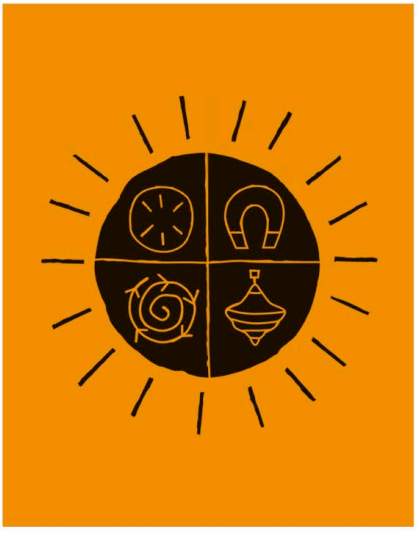
Luis de Broglie

Nacido en 1892 en Dieppe, Francia, Louis de Broglie se licenció en Historia en 1910 y en Ciencias en 1913. Fue reclutado durante la Primera Guerra Mundial y, cuando terminó la guerra, reanudó sus estudios de física. En 1924, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París, de Broglie presentó su tesis doctoral, "Recherches sur la théorie des quanta" ("Investigaciones sobre la teoría cuántica"). Esta tesis, que al principio fue recibida con asombro, pero luego confirmada por el descubrimiento del electrón difracción en 1927, sirvió de base para desarrollar la teoría de la Mecánica ondulatoria. De Broglie enseñó física teórica en el Institut Henri Poincaré de París hasta su jubilación. En 1929 recibió el Premio Nobel de Física por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones. Murió en 1987.

Trabajos clave

1924 "Recherches sur la théorie des quanta" ("Investigaciones sobre la teoría cuántica"), *Anales de la física*

1926 *Ondas y movimientos* (*Ondas y movimientos*)



UNA NUEVA IDEA DE LA REALIDAD

NÚMEROS CUÁNTICOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Wolfgang Pauli(1900-1958)

ANTES
1672 Isaac Newton divide la luz blanca en un espectro.

1802 William Hyde Wollaston ve líneas oscuras en el espectro solar.

1913 Niels Bohr presenta su modelo de capas del átomo.

DESPUÉS
1927 Niels Bohr propone la interpretación de Copenhague, afirmando que una partícula existe en todos los estados posibles hasta que es observada.

1928astrónomo indio Subrahmanyan Chandrasekhar calcula que una estrella lo suficientemente grande podría colapsar y formar un agujero negro al final de su vida.

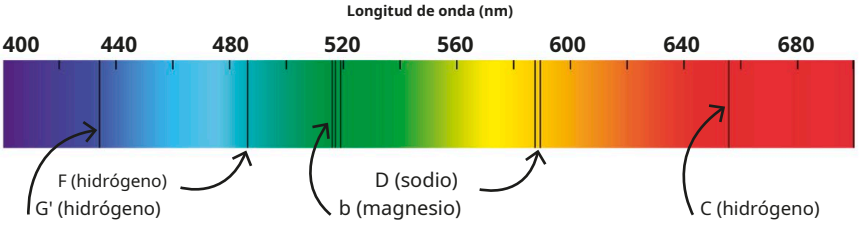
1932físico británico James Chadwick descubre el neutrón.

En 1802, el químico y físico británico William Hyde Wollaston observó que el espectro de la luz solar estaba cubierto por una serie de finas líneas oscuras. El fabricante de lentes alemán Joseph von Fraunhofer examinó estas líneas en detalle por primera vez en 1814, enumerando más de 500. En la década de 1850, el físico alemán Gustav Kirchhoff y el químico alemán Robert Bunsen descubrieron que cada elemento produce su propio conjunto único de líneas, pero no lo sabían. qué los causó.

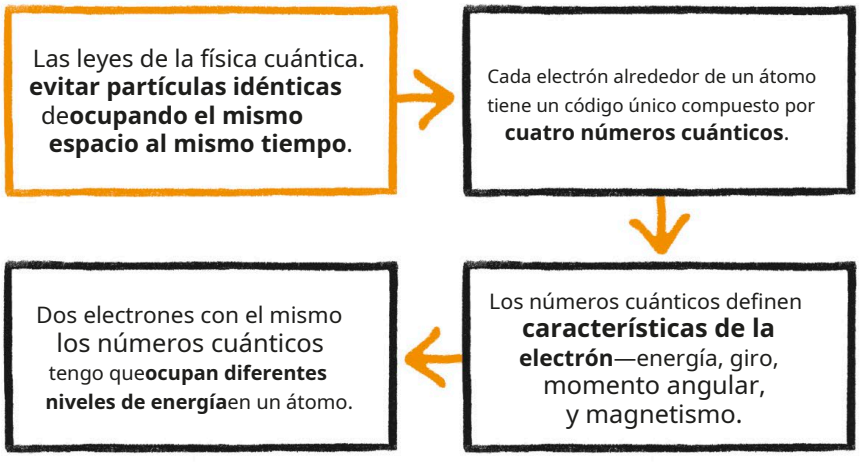
Saltos cuánticos

En 1905, Albert Einstein había explicado el efecto fotoeléctrico, mediante el cual la luz puede provocar que algunos metales emitan electrones. diciendo que la luz podría comportarse como una corriente de paquetes de energía, llamados cuantos. En 1913, el físico danés Niels Bohr propuso un modelo del átomo que tenía en cuenta tanto los cuantos como los espectros de los elementos. En el átomo de Bohr, los electrones viajaban alrededor del núcleo en órbitas fijas o cuantificadas. Los cuantos de luz (más tarde llamados fotones) que chocan contra el átomo podrían ser absorbidos por electrones, que luego se movieron a órbitas más altas (más lejos del núcleo). Un fotón suficientemente energético puede expulsar por completo a un electrón de su órbita. Por el contrario, cuando un electrón cede su energía "extra" como fotón de luz, vuelve a caer a su nivel de energía original, más cercano al

Las líneas de Fraunhofer son líneas finas y oscuras.que se superponen al espectro de la luz visible. Cada elemento produce su propio conjunto único de líneas de Fraunhofer (designadas por una o más letras), determinadas por los números cuánticos de sus electrones. Las más destacadas de estas líneas se muestran aquí.



Ver también: Monopolos magnéticos · Ondas electromagnéticas 192-195 Luz 159 del átomo 196-199 · Cuantos de energía 208–211 Partículas subatómicas 242–243



el núcleo del átomo. Estos pasos hacia arriba y hacia abajo se denominan "saltos cuánticos". Su tamaño es único para cada átomo.

Los átomos emiten luz en longitudes de onda específicas, por lo que cada elemento produce un conjunto característico de líneas espectrales. Bohr propuso que estas líneas estaban relacionadas con los niveles de energía de las órbitas de los electrones y que eran producidas por un electrón que absorbía o emitía un fotón a la frecuencia que corresponde a la línea espectral.

El nivel de energía que puede tener un electrón en un átomo se denota por el número cuántico primario o principal, norte, en el cual norte=1 es igual a la órbita más baja posible, norte=2 el siguiente más alto, y así sucesivamente. Utilizando este esquema, Bohr pudo describir el nivel de energía en el átomo más simple, el hidrógeno, en el que un solo electrón orbita alrededor de un solo protón. Los modelos posteriores que incorporaron las propiedades ondulatorias de los electrones pudieron describir átomos más grandes.

principio de exclusión de Pauli

En 1925, Wolfgang Pauli intentaba explicar la estructura de los átomos. ¿Qué decidió la energía de un electrón? nivel y el número de electrones que cada nivel de energía, o capa, podría contener? La razón que se le ocurrió fue que cada electrón tenía un código único, descrito por sus cuatro números cuánticos: energía, espín, momento angular y magnetismo. El principio de exclusión establecía que dos electrones de un átomo no podían compartir los mismos cuatro números cuánticos. No dos partículas idénticas podrían ocupar el mismo estado al mismo tiempo. Dos electrones podrían ocupar la misma capa, pero sólo si tuvieran espines opuestos, por ejemplo.

> La física es resolver acertijos, pero de acertijos creados por la naturaleza, no por la mente del hombre.
>
> **María Goeppert Mayer**
> **físico alemán-estadounidense**

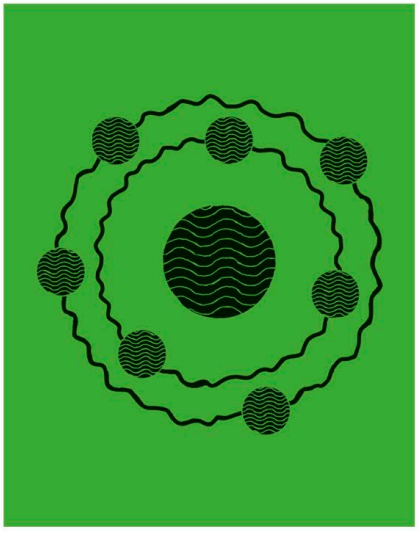
Wolfgang Pauli

Hijo de un químico, Wolfgang Pauli nació en 1900 en Viena, Austria. Se dice que cuando era colegial pasó de contrabando a la escuela los artículos de Albert Einstein sobre la relatividad especial para leerlos en su escritorio. Como estudiante en la Universidad de Munich en Alemania, Pauli publicó su primer artículo sobre la relatividad en 1921. Este fue elogiado por el propio Einstein.

Después de graduarse, Pauli ayudó al físico Max Born en la Universidad de Göttingen, Alemania. La amenaza de persecución nazi le llevó a trasladarse a Princeton, Nueva Jersey, en 1940 y posteriormente se convirtió en ciudadano estadounidense. Recibió el Premio Nobel en 1945 por su descubrimiento del principio de exclusión. Pauli se mudó a Zurich, Suiza, en 1946 y trabajó como profesor de la Eidgenössische Technische Hochschule de la ciudad hasta su muerte en 1958.

Trabajos clave

1926 *Teoría cuántica*
1933 "Principios de la mecánica ondulatoria"



TODO ES ONDAS

MATRICES Y ONDAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Erwin Schrodinger
(1887-1961)

ANTES
1897JJ Thomson descubre el electrón y sugiere que es el portador de electricidad.

1924 Louis de Broglie propone que las partículas tienen propiedades ondulatorias.

DESPUÉS
1927 Werner Heisenberg publica su principio de incertidumbre.

1927 Niels Bohr apoya la interpretación de Copenhague, afirmando que la observación determina la magnitud cuántica. estado de una partícula.

1935 Erwin Schrödinger plantea el escenario de un gato que está vivo y muerto al mismo tiempo para ilustrar un problema de la interpretación de Copenhague.

En la década de 1920, los científicos comenzaban a cuestionar el modelo del átomo que el físico danés Niels Bohr había propuesto en 1913. Los experimentos habían comenzado a demostrar no sólo que la luz podía comportarse como una corriente de partículas, sino también que los electrones podían actuar como ondas.

El físico alemán Werner Heisenberg intentó desarrollar un sistema de mecánica cuántica que se basara únicamente en lo que se podía observar. Era imposible ver un electrón orbitando directamente alrededor de un átomo, pero era posible observar el Luz absorbida y emitida por los átomos cuando un electrón salta de una órbita a otra. Usó estas observaciones para producir tablas de números para representar las posiciones y el momento de los electrones y elaboró reglas para calcular los valores de estas propiedades.

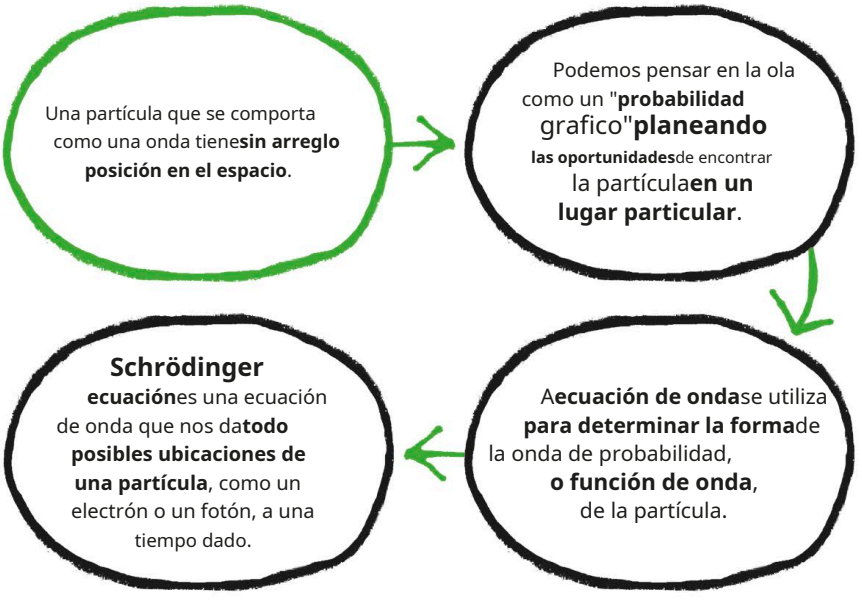
> ¿Por qué todos los experimentos que involucran, digamos, la posición de un partícula hace que la partícula esté de repente en algún lugar en lugar de en todas partes?
> Nadie sabe.
> **Christophe Galfard**
> **físico francés**

Mecánica matricial

En 1925, Heisenberg compartió sus cálculos con el físico judío alemán Max Born, quien se dio cuenta de que este tipo de tabla se conocía como matriz. Junto con el alumno de Born, Pascual Jordan, Born y Heisenberg elaboraron una nueva teoría de la mecánica matricial que podría usarse para vincular las energías de los electrones con las líneas que se habían observado en el espectro de luz visible.

Una de las cosas interesantes de la mecánica matricial es que el orden en que se realizan los cálculos es importante. Calcular el momento y luego la posición de una partícula dará un resultado diferente al calcular primero la posición y luego el momento. Fue esta diferencia la que llevaría a Heisenberg a su principio de incertidumbre, que establecía que en la mecánica cuántica la velocidad

Ver también: Ondas electromagnéticas 192–195 · Luz del átomo 196–199 · Energía cuantos 208–211 · Principio de incertidumbre de Heisenberg 220-221 · Antimateria 246



La posición de un objeto y su posición no pueden medirse exactamente al mismo tiempo.

En 1926, el físico austriaco Erwin Schrödinger ideó una ecuación que determina cómo se forman las ondas de probabilidad o funciones de onda (descripciones matemáticas de un sistema cuántico) y cómo evolucionan. La ecuación de Schrödinger es tan importante para el mundo subatómico de la cuántica

> ¿Es posible que la naturaleza sea tan absurda como nos pareció en estos experimentos atómicos?
>
> **Werner Heisenberg**

La mecánica como lo son las leyes del movimiento de Newton para eventos a gran escala. Schrödinger probó su ecuación en el átomo de hidrógeno y descubrió que predecía sus propiedades con gran precisión.

En 1928, el físico británico Paul Dirac unió la ecuación de Schrödinger con la relatividad especial de Einstein, que había demostrado el vínculo entre masa y energía, resumido en el famoso $mi=mc^2$ ecuación. La ecuación de Dirac era consistente tanto con la relatividad especial como con la mecánica cuántica en su descripción de los electrones y otras partículas. Propuso que se debería considerar que los electrones surgen de un campo electrónico, del mismo modo que los fotones surgen del campo electromagnético.

Una combinación de las matrices de Heisenberg y las ecuaciones de Schrödinger y Dirac sentó las bases de dos fundamentos de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre y la interpretación de Copenhague.

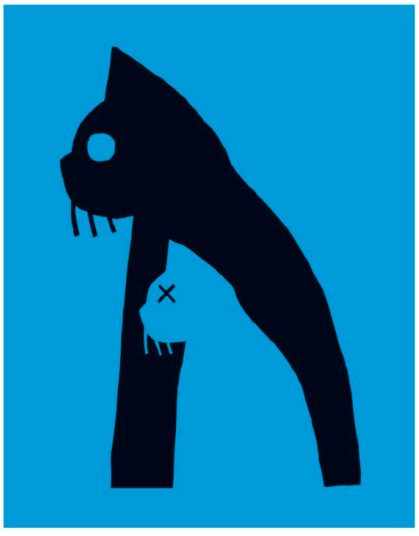
Erwin Schrodinger

Erwin Schrödinger nació en 1887 en Viena, Austria, y estudió física teórica. Después de servir en la Primera Guerra Mundial, ocupó puestos en universidades de Zurich, Suiza y Berlín, Alemania. En 1933, cuando los nazis llegaron al poder en Alemania, se mudó a Oxford en el Reino Unido.

Ese mismo año compartió el Premio Nobel con el físico teórico británico Paul Dirac por "el descubrimiento de nuevas formas productivas de teoría atómica". En 1939, se convirtió en director de física teórica en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, Irlanda. Se retiró a Viena en 1956 y murió en 1961. Fascinado por la filosofía, Schrödinger sigue siendo mejor conocido por su experimento mental de 1935, El gato de Schrödinger, que examinó la idea de que un sistema cuántico podría existir en dos estados diferentes simultáneamente.

Trabajos clave

1926 "Una teoría ondulatoria de la mecánica de átomos y moléculas". *Revisión física* **1935** "La situación actual de la mecánica cuántica"



EL GATO ES AMBOS VIVO Y MUERTO

PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Werner Heisenberg
(1901-1976)

ANTES

1905 Einstein propone que la luz está formada por paquetes discretos llamados fotones.

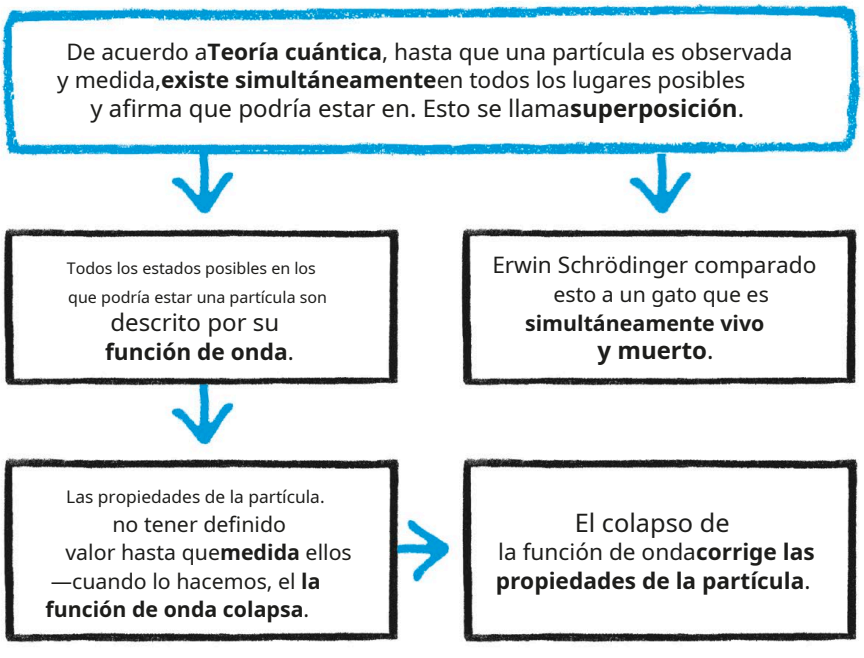
1913 Niels Bohr presenta un modelo del átomo con electrones alrededor de un núcleo.

1924 El físico francés Louis de Broglie sugiere que las partículas de materia también pueden considerarse ondas.

DESPUÉS

1935 Einstein, el físico ruso-estadounidense Boris Podolsky y el físico israelí Nathan Rosen publican la "paradoja EPR", desafiando la interpretación de Copenhague.

1957 El físico estadounidense Hugh Everett presenta su "teoría de los muchos mundos" para explicar la interpretación de Copenhague.



En la física clásica, se aceptaba generalmente que la exactitud de cualquier medición sólo estaba limitada por la precisión de los instrumentos utilizados. En 1927, Werner Heisenberg demostró que esto no era así.

Heisenberg se preguntó qué significaba realmente definir la posición de una partícula. Sólo podemos saber dónde está algo interactuando con él. Para determinar la posición de un electrón, hacemos rebotar un fotón en él. La precisión de la medición está determinada por la longitud de onda del fotón; cuanto mayor sea la frecuencia del fotón, más precisa será la posición del electrón.

Max Planck había demostrado que la energía de un fotón está relacionada con su frecuencia mediante la fórmula $mi=hn$orte,

Ver también: Energía y movimiento 56–57 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Luz del átomo 196–199 · Cuantos de energía 208–211 · Partículas y ondas 212–215 · Matrices y ondas 218–219

Werner Heisenberg

Werner Heisenberg nació en 1901 en Würzburg, Alemania. En 1924 empezó a trabajar con Niels Bohr en la Universidad de Copenhague. El nombre de Heisenberg siempre estará asociado a su principio de incertidumbre, publicado en 1927, y recibió el Premio Nobel de Física en 1932 por la creación de la mecánica cuántica.

En 1941, durante la Segunda Guerra Mundial, Heisenberg fue nombrado director del Instituto Kaiser Wilhelm de Física (más tarde rebautizado como Instituto Max Planck) en Munich, y fue puesto a cargo de la bomba atómica de la Alemania nazi. proyecto. No está claro si esto fracasó por falta de recursos o porque Heisenberg quería que fracasara. Finalmente, las tropas estadounidenses lo hicieron prisionero y lo enviaron al Reino Unido.

Después de la guerra, se desempeñó como director del Instituto Max Planck hasta que dimitió en 1970. Murió en 1976.

Trabajos clave

1925 "Sobre la mecánica cuántica"
1927 "Sobre el contenido perceptivo de la cinemática y la mecánica teórica cuántica"

dónde mi es igual a energía, nor tees igual a la frecuencia, y h es la constante de Planck. Cuanto mayor sea la frecuencia del fotón, más energía transportará y más desviará al electrón de su curso. Sabemos dónde está el electrón en ese momento. momento, pero no podemos saber hacia dónde se dirige. Si fuera posible medir el momento del electrón con absoluta precisión, su ubicación sería completamente incierta, y viceversa.

Heisenberg demostró que la incertidumbre en el momento multiplicada por la incertidumbre en la posición nunca puede ser menor que una fracción de la constante de Planck. El principio de incertidumbre es una propiedad fundamental de la universo que pone un límite a lo que podemos conocer simultáneamente.

Interpretación de Copenhague

Lo que llegó a conocerse como la "interpretación de Copenhague" de la física cuántica fue defendida por Niels Bohr. Aceptó que, como había demostrado Heisenberg, hay algunas cosas que simplemente no podemos saber. sobre el universo. Las propiedades de una partícula cuántica no tienen un valor definido hasta que se realiza una medición. Es imposible diseñar un experimento que nos permita ver un electrón como onda y partícula al mismo tiempo, por ejemplo. La naturaleza ondulatoria y partícula de la materia son dos caras de la misma moneda, sugirió Bohr. La interpretación de Copenhague abrió una marcada división entre la física clásica y la física cuántica sobre si los sistemas físicos tienen o no propiedades definidas antes de ser medidos.

El gato de Schrödinger

Según la interpretación de Copenhague, cualquier estado cuántico puede verse como la suma de dos o más estados distintos, lo que se conoce como superposición, hasta que se observa, momento en el que se convierte en uno o en el otro.

Erwin Schrödinger preguntó: ¿cuándo se pasa de la superposición a una realidad definida? Describió el escenario de un gato en una caja, junto con un Veneno que se liberará cuando ocurra un evento cuántico. Según la interpretación de Copenhague, el gato se encuentra en el estado de superposición de estar vivo y muerto hasta que alguien mira dentro de la caja, lo que Schrödinger pensó que era ridículo. Bohr replicó que no había ninguna razón por la que las reglas de la física clásica debieran aplicarse también al reino cuántico: así eran las cosas.

> Los átomos o partículas elementales en sí mismos no son reales; Forman un mundo de potencialidades o posibilidades. en lugar de uno de cosas o hechos.
>
> **Werner Heisenberg**

ACCIÓN ESPECTACULAR A UNA DISTANCIA

ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
John Stewart Bell
(1928-1990)

ANTES
1905 Albert Einstein publica su teoría de la relatividad especial, que se basa en parte en la idea de que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz.

1926 Erwin Schrodinger publica su ecuación de onda.

1927 Niels Bohr defiende la interpretación de Copenhague sobre la forma en que los sistemas cuánticos interactúan con el mundo a gran escala.

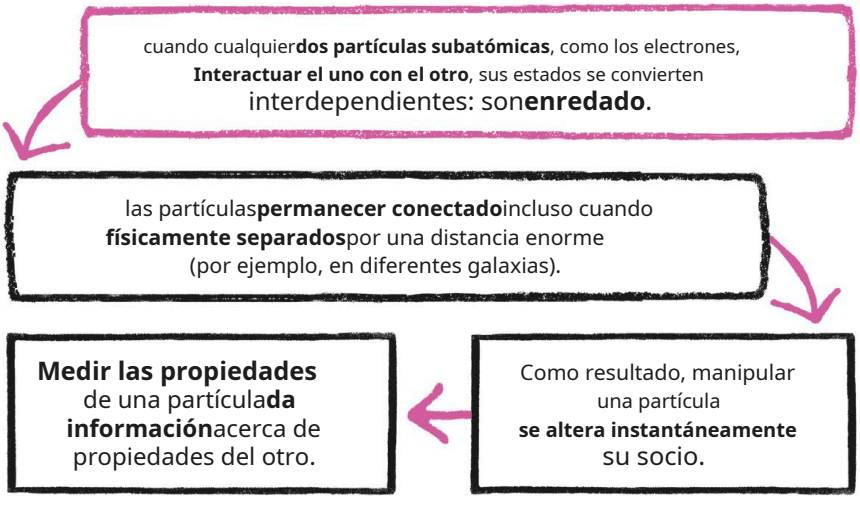
DESPUÉS
1981 Richard Feynman propone la superposición y el entrelazamiento de partículas como base para una computadora cuántica.

1995cuántica austriaca
El físico Anton Zeilinger demuestra la conmutación entre ondas y partículas en un experimento utilizando fotones entrelazados.

Uno de los principios principales de la mecánica cuántica es la idea de incertidumbre; No se pueden medir todas las características de un sistema simultáneamente, por perfecto que sea el experimento. La interpretación de Copenhague de la física cuántica defendida por Niels Bohr dice efectivamente que el acto mismo de medición selecciona las características que se observan.

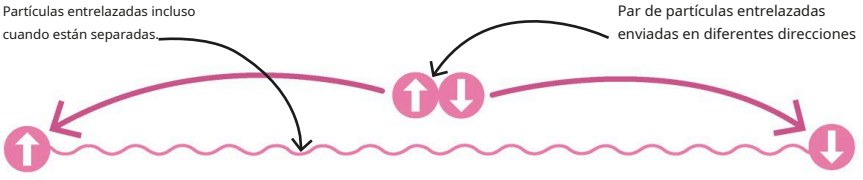
Otra propiedad peculiar de la mecánica cuántica se llama "entrelazamiento". Si, por ejemplo, se expulsan dos electrones de un sistema cuántico, entonces la conservación Las leyes del momento nos dicen que el momento de una partícula es igual y opuesto al de la otra. Según la interpretación de Copenhague, ninguna partícula tendrá un estado definido hasta que se mida, pero medir el momento de una determinará el estado y el momento de la otra, independientemente de la distancia entre las partículas.

Esto se conoce como “comportamiento no local”, aunque Albert Einstein lo llamó “acción espeluznante a distancia”. En 1935, Einstein atacó el entrelazamiento, afirmando que



Ver también: Cuantos de energía 208–211 · Principio de incertidumbre de Heisenberg 220-221 · Aplicaciones cuánticas 226–231 · Relatividad especial 276–279

Partícula A y partícula B han interactuado entre sí y se han enredado. Permanecerán enredados incluso si se envían en direcciones diferentes.



Hay "variables ocultas" en el trabajo que lo hacen innecesario. Sostuvo que para que una partícula afectara a la otra, se requeriría una señal más rápida que la luz entre ellas (lo cual estaba prohibido por la teoría de la relatividad especial de Einstein).

teorema de bell

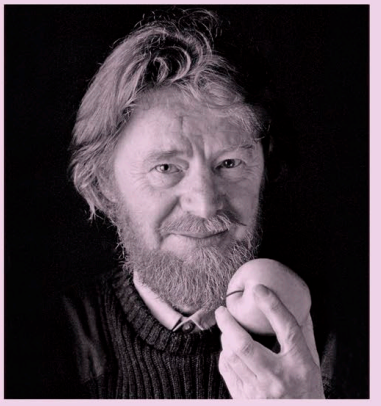
En 1964, el físico norirlandés John Stewart Bell propuso un experimento que podría probar si las partículas entrelazadas realmente se comunicaban entre sí más rápido que la luz. Imaginó el caso de un par de electrones entrelazados, uno con espín ascendente y el otro con espín descendente. Según la teoría cuántica, los dos electrones están en una superposición de estados hasta que se miden; cualquiera de ellos podría girar hacia arriba o hacia abajo. Sin embargo, una vez que se mide uno, sabemos con certeza que el otro tiene que ser su opuesto. Fórmulas derivadas de Bell, llamadas desigualdades de Bell, que determinan con qué frecuencia debe girar la partícula A.

correlacionarse con el de la partícula B si la probabilidad normal (a diferencia del entrelazamiento cuántico) está en juego. La distribución estadística de sus resultados demostró matemáticamente que las "variables ocultas" de Einstein

La idea no es cierta y que existe una conexión instantánea entre partículas entrelazadas. El físico Fritjof Capra sostiene que el teorema de Bell demuestra que el universo es "fundamentalmente interconectados".

Experimentos como el realizado por el físico francés Alain Aspect a principios de los años 1980 (que utilizó pares de fotones entrelazados generados por láser) demostrar de manera convincente que la "acción a distancia" es real: el reino cuántico no está sujeto a reglas de localidad. Cuando dos partículas se entrelazan, son efectivamente un sistema único que tiene una única función cuántica.

Esta obra de arte conceptual por computadora muestra un par de partículas que se han entrelazado: manipular una resultará en manipular la otra, independientemente de la distancia entre ellas. El entrelazamiento tiene aplicaciones en las nuevas tecnologías de computación cuántica y criptografía cuántica.

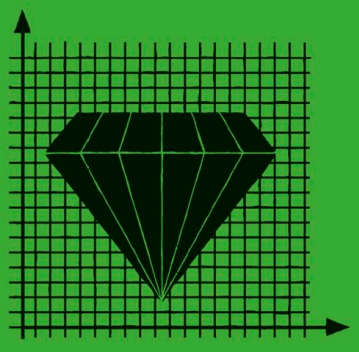


John Stewart Bell

John Stewart Bell nació en 1928 en Belfast, Irlanda del Norte. Después de graduarse en la Queen's University de Belfast, obtuvo un doctorado en física nuclear y teoría cuántica de campos en la Universidad de Birmingham. Luego trabajó en el Atomic Research Establishment en Harwell, Reino Unido, y más tarde en la Organización Europea para la Energía Nuclear.
Investigación (CERN) en Ginebra, Suiza. Allí trabajó en ciencia teórica de partículas y diseño de aceleradores. Después de pasar un año en Stanford, Wisconsin-Madison y
En las universidades Brandeis de Estados Unidos, Bell publicó su revolucionario artículo en 1964, en el que proponía una manera de distinguir entre la teoría cuántica y la noción de realidad local de Einstein. Fue elegido miembro de la Academia Estadounidense de Artes y Ciencias en 1987. La temprana muerte de Bell en 1990 a la edad de 62 años significó que no vivió para ver sus ideas probadas experimentalmente.

Obra clave

1964 "Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen", *Física*



LA JOYA DE FÍSICA

TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Richard Feynman
(1918-1988)

ANTES
1873 James Clerk Maxwell publica sus ecuaciones que describen las propiedades del campo electromagnético.

1905 Einstein propone que la luz, además de actuar como una onda, puede imaginarse como una corriente de partículas llamadas cuantos.

DESPUÉS
1968Físicos teóricos Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg presentan su teoría de la fuerza electrodébil, uniendo las fuerzas electromagnética y nuclear débil.

1968 Experimentos en el Laboratorio del Acelerador Lineal de Stanford, California, descubren evidencia de quarks, los componentes básicos de partículas subatómicas.

oh Una de las mayores deficiencias de la mecánica cuántica es que no logra tomar En cuenta las teorías de la relatividad de Einstein. Uno de los primeros en intentar conciliar estos pilares de la física moderna fue el físico británico Paul Dirac. Publicada en 1928, la ecuación de Dirac consideraba a los electrones como excitaciones de un campo electrónico, de la misma manera que los fotones podían verse como excitaciones de un campo electromagnético. La ecuación se convirtió en uno de los fundamentos de la teoría cuántica de campos.

La idea de campos que transportan fuerzas a través de una distancia está bien establecida en física. Se puede considerar un campo como cualquier cosa que tenga valores que varían en el espacio y el tiempo. Por ejemplo, el patrón formado por limaduras de hierro esparcidas alrededor de una barra magnética traza las líneas de fuerza en un campo magnético.

En la década de 1920, la teoría cuántica de campos propuso un enfoque diferente, que sugería que las fuerzas se transmitían por medio de partículas cuánticas, como los fotones (partículas de luz que son las partículas portadoras del electromagnetismo). Otras partículas que se descubrieron posteriormente,

Ver también: Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142–147 · Aplicaciones cuánticas 226–231 El zoológico de partículas y quarks 256–257 · Portadores de fuerza 258–259 Electrodinámica cuántica 260 · El bosón de Higgs 262-263

> Lo que observamos no es la naturaleza en sí, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de interrogatorio.
>
> **Werner Heisenberg**

Se cree que tales como el quark, el gluón y el bosón de Higgs (una partícula elemental que da masa a las partículas) tienen sus propios campos asociados.

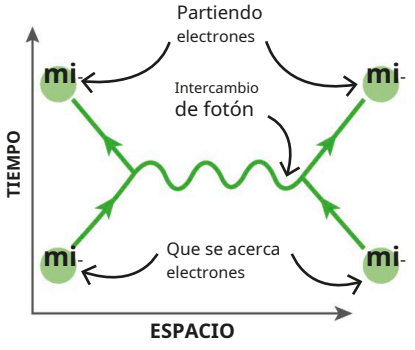
QED

La electrodinámica cuántica, o QED, es la teoría cuántica de campos que se ocupa de la fuerza electromagnética. La teoría de la QED fue desarrollada total (e independientemente) por Richard Feynman y Julian Schwinger en los EE. UU. y Shin'ichirō. Tomonaga en Japón. Propone que las partículas cargadas, como los electrones, interactúen entre sí emitiendo y absorbiendo fotones. Esto se puede visualizar mediante diagramas de Feynman, desarrollados por Richard Feynman (ver a la derecha).

La QED es una de las teorías más asombrosamente precisas jamás formuladas. Su predicción de la fuerza del campo magnético asociado con un electrón es tan cercana al valor producido, que si la distancia de Londres a Tombuctú se midiera con la misma precisión, sería exacta al alcance de un cabello.

El modelo estándar

La QED fue un trampolín hacia la construcción de teorías cuánticas de campos para las otras fuerzas fundamentales de la naturaleza. El modelo estándar combina dos teorías de la física de partículas en un solo marco, que describe tres de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas (las interacciones electromagnética, débil y fuerte), pero no la gravedad. El más fuerte de ellos es el fuerte.



Este diagrama de Feynman representa la repulsión electromagnética. Dos electrones (e-) se acercan, intercambian un fotón y luego se separan.

Interacción, o fuerza nuclear fuerte, que une los protones y neutrones en el núcleo de un átomo. La teoría electrodébil propone que las interacciones electromagnética y débil pueden considerarse dos facetas de una única interacción "electrodébil". El Modelo Estándar también clasifica todas las partículas elementales conocidas. Conciliar la fuerza gravitacional con el modelo estándar sigue siendo uno de los mayores desafíos de la física.

Richard Feynman

Nacido en 1918, Richard Feynman creció en la ciudad de Nueva York. Fascinado por las matemáticas desde temprana edad, ganó una beca para el Instituto Tecnológico de Massachusetts y obtuvo una puntuación perfecta en su solicitud de doctorado en Princeton. En 1942 se unió al Proyecto Manhattan para desarrollar la primera bomba atómica.

Después de la guerra, Feynman trabajó en la Universidad de Cornell, donde desarrolló la teoría QED, por la que recibió conjuntamente el Premio Nobel en 1965. Se trasladó al Instituto de Tecnología de California en 1960.

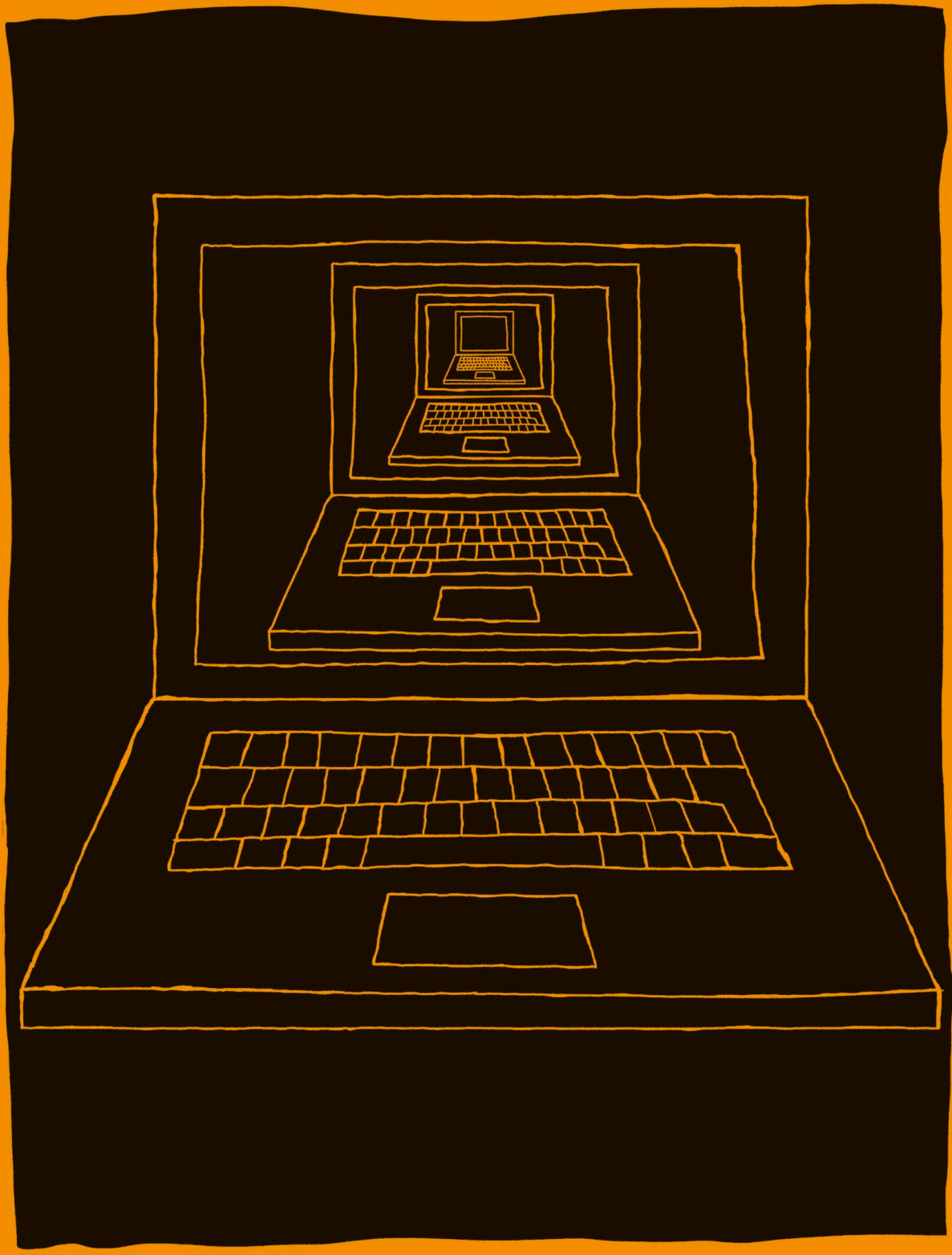
Su autobiografía, *¡Seguramente está bromeando, Sr. Feynman!*, es uno de los libros más vendidos escritos por un científico. Uno de sus últimos grandes logros fue Descubriendo la causa del desastre del transbordador espacial Challenger de la NASA en 1986. Murió en 1988.

Trabajos clave

1967 *El carácter de la ley física*
1985 *QED: La extraña teoría de la luz y la materia*
1985 *¡Seguramente está bromeando, Sr. Feynman!*

COLABORACIÓN ENTRE PARALELOS UNIVERSOS

APLICACIONES CUÁNTICAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
David Deutsch(1953–)

ANTES
1911 Heike Kamerlingh Onnes descubre la superconductividad en el mercurio superenfriado.

1981 Richard Feynman propone la idea de una computadora cuántica.

1981 El físico francés Alain Aspect demuestra que se produce un entrelazamiento cuántico, es decir, la unión de partículas emparejadas.

1988 El físico estadounidense Mark Reed acuña el término "puntos cuánticos".

DESPUÉS
2009 Investigadores de la Universidad de Yale utilizan un chip superconductor de 2 qubits (bits cuánticos) para crear el primer procesador cuántico de estado sólido.

2019 Se lanza el IBM Q System One con 20 qubits.

El gran reino de la física cuántica parece estar muy lejos del sentido común.

mundo cotidiano, pero ha dado lugar a una sorprendente cantidad de avances tecnológicos que desempeñan un papel vital en nuestras vidas. Las computadoras y los semiconductores, las redes de comunicaciones e Internet, el GPS y los escáneres de resonancia magnética, todos dependen del mundo cuántico.

Superconductores

En 1911, el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes hizo un descubrimiento notable cuando experimentaba con mercurio a muy baja temperatura.

El efecto Meissner Es la expulsión de un campo magnético de un material superconductor, lo que hace que un imán levite sobre él.

temperaturas bajas. Cuando la temperatura del mercurio alcanzó -268,95°C, su resistencia eléctrica desapareció. Esto significaba que, en teoría, una corriente eléctrica podría fluir a través de un circuito de mercurio sobreenfriado para siempre.

Los físicos estadounidenses John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer dieron una explicación a este extraño fenómeno en 1957. A temperaturas muy bajas, los electrones forman los llamados “pares de Cooper”. Mientras que un solo electrón tiene que obedecer el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que dos electrones compartan el mismo estado cuántico, los pares de Cooper forman un "condensado". Esto significa que los pares actúan como si fueran un solo cuerpo, sin resistencia del material conductor, en lugar de una colección de electrones que fluyen a través del conductor. Bardeen, Cooper y Schrieffer ganaron el Premio Nobel de Física en 1972 por este descubrimiento.

En 1962, el físico galés Brian Josephson predijo que los pares de Cooper deberían poder atravesar una barrera aislante entre dos superconductores.
Si se aplica un voltaje a través de uno

En estas uniones, conocidas como “uniones Josephson”, la corriente vibra a una frecuencia muy alta. Las frecuencias se pueden medir con mucha mayor precisión que los voltajes, y las uniones Josephson se han utilizado en dispositivos como SQUIDS (dispositivos de interferencia cuántica superconductora) para examinar los diminutos campos magnéticos producidos por el cerebro humano. También tienen potencial para su uso en computadoras ultrarrápidas.

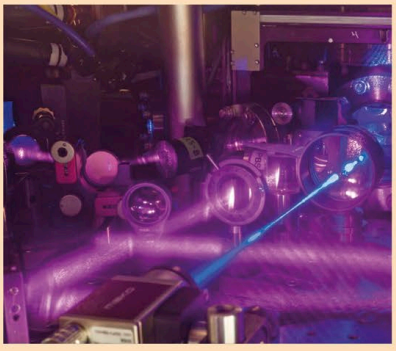
Sin superconductividad, las poderosas fuerzas magnéticas aprovechadas en los escáneres de imágenes por resonancia magnética (MRI) no serían posibles.
posible. Los superconductores también actúan para expulsar campos magnéticos. Se trata del efecto Meissner, un fenómeno que ha permitido la construcción de trenes levitados magnéticamente.

superfluidos

Kamerlingh Onnes fue también la primera persona en licuar helio. En 1938, el físico ruso Pyotr Kapitsa y los físicos británicos John Allen y Don Misener descubrieron que debajo

> Tecnología a la vanguardia del esfuerzo humano es difícil. Pero eso es lo que hace que valga la pena. **Michelle Yvonne simmons**
> **Profesor de física cuántica**

Ver también: Fluidos 76–79 · Corriente eléctrica y resistencia 130–133. Electrónica 152–155 · Partículas y ondas 212–215 · Principio de incertidumbre de Heisenberg 220-221 Entrelazamiento cuántico 222-223 · Ondas gravitacionales 312–315



Un rayo láser azul excita átomos de estroncio en el reloj atómico de gas cuántico tridimensional desarrollado por físicos de JILA en Boulder, Colorado.

Relojes cuánticos

Un cronometraje confiable es crucial para sincronizar las actividades de las que depende nuestro mundo tecnológico. Los relojes más precisos del mundo hoy en día son los relojes atómicos, que utilizan átomos que "saltan" de un lado a otro entre estados de energía como su "péndulo".

El primer reloj atómico preciso fue construido en 1955 por el físico Louis Essen en el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido. A finales de la década de 1990 se produjeron importantes avances en la tecnología del reloj atómico, incluido el enfriamiento de los átomos hasta casi temperaturas del cero absoluto ralentizándolas con láseres.

Hoy en día, los relojes atómicos más precisos miden el tiempo utilizando las transiciones entre los estados de espín en el núcleo de un átomo. Hasta hace poco utilizaban átomos del isótopo cesio-133. Estos relojes pueden alcanzar una precisión equivalente a ganar o perder un segundo durante 300 millones de años y son cruciales para la navegación GPS y las telecomunicaciones. El reloj atómico más reciente utiliza átomos de estroncio y se cree que es aún más preciso.

-270,98°C, el helio líquido perdió completamente su viscosidad, aparentemente fluía sin fricción aparente y poseía una conductividad térmica que superaba con creces la de los mejores conductores metálicos. Cuando el helio está en estado superfluido, no se comporta como a temperaturas más altas. Fluye por el borde de un recipiente y se filtra por los agujeros más pequeños. Cuando se pone a girar, no deja de girar. El satélite astronómico infrarrojo (IRAS) lanzado en 1983 fue enfriado por helio superfluido.

Un fluido se convierte en superfluido cuando sus átomos comienzan a ocupar los mismos estados cuánticos; en esencia, pierden sus identidades individuales y se convierten en una sola entidad.

Los superfluidos son el único fenómeno cuántico que se puede observar a simple vista.

Túneles y transistores

Algunos de los dispositivos que utilizamos a diario, como la tecnología de pantalla táctil de los teléfonos móviles, no funcionarían si no fuera por el extraño fenómeno del túnel cuántico. Primero explorado en la década de 1920, por el físico alemán Friedrich Hund y otros, este fenómeno permite que las partículas atraviesen barreras que tradicionalmente serían infranqueables. Esta rareza surge al considerar a los electrones, por ejemplo, como ondas de probabilidad en lugar de partículas que existen en un punto particular. En los transistores, por ejemplo, el túnel cuántico permite que los electrones atraviesen una unión entre semiconductores. Esto puede causar problemas, ya que los chips se vuelven más pequeños y las capas aislantes entre los componentes se vuelven demasiado delgadas para detener los electrones, lo que hace imposible apagar el dispositivo.

Imágenes cuánticas

Un microscopio electrónico depende de la dualidad onda/partícula de los electrones. Funciona de manera similar-

En física clásica, un objeto (por ejemplo, una pelota que rueda) no puede cruzar una barrera sin ganar suficiente energía para superarla. Sin embargo, una partícula cuántica tiene propiedades ondulatorias y nunca podremos saber exactamente cuánta energía tiene. Puede que tenga suficiente energía para atravesar una barrera.

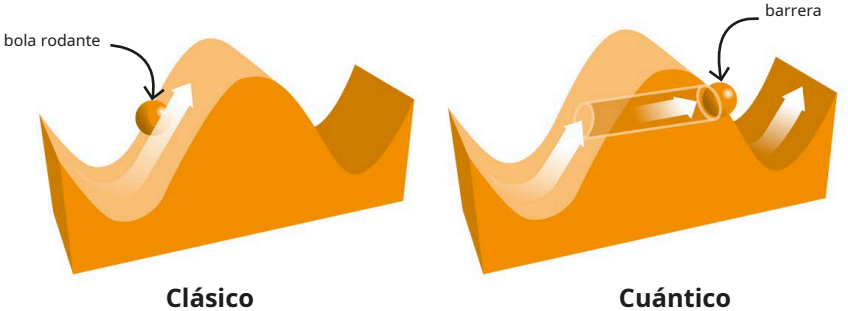


Imagen de resonancia magnética(Los escáneres MRI) producen imágenes detalladas, como esta imagen del cerebro humano, utilizando un campo magnético y ondas de radio.

camino a un microscopio óptico, pero en lugar de usar lentes para enfocar la luz, emplea imanes para enfocar haces de electrones. A medida que la corriente de electrones pasa a través de la "lente" magnética, se comportan como partículas cuando el imán desvía su camino, enfocándolos en la muestra que se va a examinar. Ahora actúan como ondas, difractándose alrededor del objeto y hacia una pantalla fluorescente donde se forma una imagen. La longitud de onda de un electrón es mucho más pequeña que la de la luz, lo que permite una resolución de imagen de objetos millones de veces más pequeña que la que se puede ver con un microscopio óptico.

La resonancia magnética (MRI) fue desarrollada en la década de 1970 por investigadores como Paul Lauterbur en Estados Unidos y Peter Mansfield en el Reino Unido. Dentro de un escáner de resonancia magnética, el paciente está rodeado por un campo magnético miles de veces más potente que el de la Tierra. producido por un electroimán superconductor. Este campo magnético afecta el giro de los protones que forman los átomos de hidrógeno en las moléculas de agua que constituyen gran parte del cuerpo humano. magnetizándolos de una manera particular. Luego se utilizan ondas de radio para alterar el giro de los protones, cambiando la forma en que se magnetizan. Cuando se apagan las ondas de radio, los protones vuelven al estado de giro anterior, emitiendo una señal que se registra electrónicamente y se convierte en imágenes de los tejidos corporales de los que forman parte.

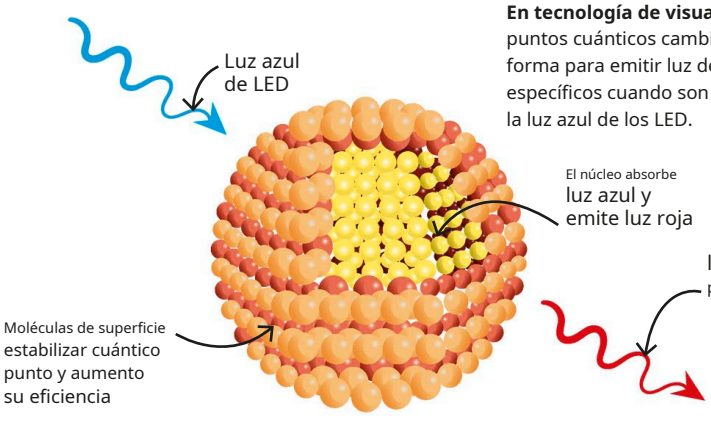
Puntos cuánticos

Los puntos cuánticos son nanopartículas, que normalmente constan de unas pocas docenas de átomos, hechas de Materiales semiconductores. Fueron creados por primera vez por el físico ruso Alexey Ekimov y el físico estadounidense Louis Brus, que trabajaban de forma independiente a principios de los años 1980. Los electrones dentro de los semiconductores están encerrados dentro de la red cristalina que constituye el material, pero pueden liberarse si son excitados por fotones. Cuando los electrones están libres, la resistencia eléctrica del semiconductor cae rápidamente, permitiendo que la corriente fluya más fácilmente.

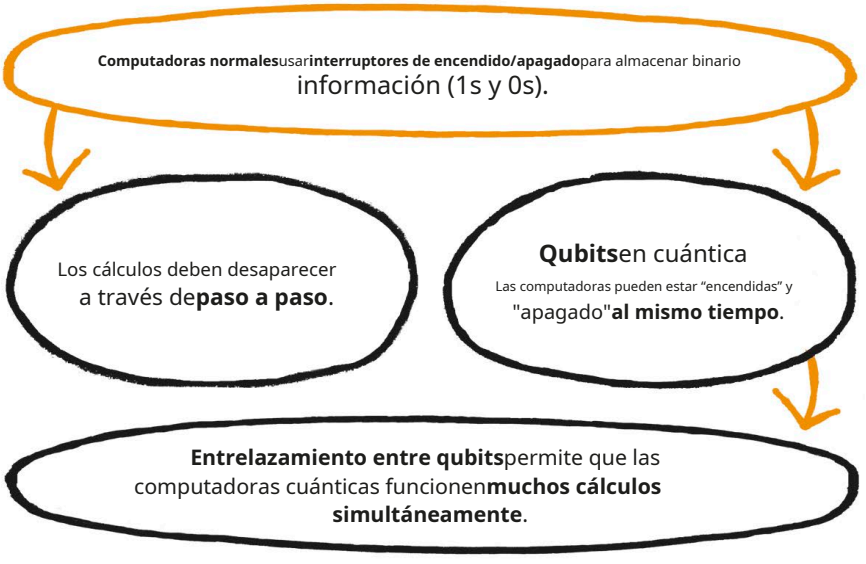
La tecnología de puntos cuánticos se puede utilizar en pantallas de televisión y de computadora para producir imágenes con gran detalle. Los puntos cuánticos se pueden controlar con precisión para hacer todo tipo de cosas útiles. Los electrones en un punto cuántico ocupan cada uno un estado cuántico diferente, por lo que el punto tiene niveles de energía discretos como un átomo individual. El punto cuántico puede absorber y emitir energía a medida que los electrones se mueven entre niveles. La frecuencia de la luz emitida depende del espacio entre los niveles, que está determinado por el tamaño del punto: los puntos más grandes brillan en el extremo rojo del espectro y los puntos más pequeños en el azul. La luminosidad de los puntos se puede ajustar con precisión variando su tamaño.

Computación cuántica

Es probable que la tecnología de puntos cuánticos se utilice en la construcción de computadoras cuánticas. Las computadoras dependen de bits binarios de información, correspondiente a las posiciones de encendido (1) y apagado (0) de sus interruptores electrónicos. El espín es una propiedad cuántica que parece aparecer con bastante frecuencia en la tecnología cuántica. Es el espín del electrón lo que confiere a algunos materiales sus propiedades magnéticas. Usando láseres, es posible llevar los electrones a un estado de superposición en el que tienen espín ascendente y descendente al mismo tiempo. En teoría, estos electrones de superposición pueden usarse como qubits (bits cuánticos) que efectivamente pueden estar "encendidos", "apagados" y algo intermedio, todo al mismo tiempo. También se pueden utilizar como qubits otras partículas, como los fotones polarizados. Fue Richard Feynman.



En tecnología de visualización, los puntos cuánticos cambian su tamaño y forma para emitir luz de colores específicos cuando son estimulados por la luz azul de los LED.



quien sugirió por primera vez, en 1981, que se liberaría una enorme potencia informática si se pudiera explotar el estado de superposición. Potencialmente, los qubits se pueden utilizar para codificar y procesar mucha más información que el simple bit binario de una computadora.

En 1985, el físico británico David Deutsch comenzó a exponer ideas sobre cómo podría funcionar realmente una computadora cuántica de este tipo. El campo de la informática se basa en gran parte en la idea de la "computadora universal", sugerida por primera vez por el matemático británico Alan Turing en la década de 1930. Deutsch señaló que el concepto de Turing estaba limitado por su dependencia de la física clásica y, por lo tanto, representaría sólo un subconjunto de posibles computadoras. Deutsch propuso una computadora universal basada en la física cuántica y comenzó a reescribir el trabajo de Turing en términos cuánticos.

La potencia de los qubits es tal que sólo 10 son suficientes para permitir el procesamiento simultáneo de 1.023 números; con 40 qubits, el número posible de cálculos paralelos superará el billón. Antes de las computadoras cuánticas se convierta en realidad, habrá que resolver el problema de la decoherencia. La perturbación más pequeña colapsará o descoherirá el estado de superposición. La computación cuántica podría evitar esto haciendo uso del fenómeno del entrelazamiento cuántico, que es lo que Einstein llamó "acción espeluznante a distancia". Esto permite que una partícula afecte a otra en otro lugar y podría permitir determinar indirectamente el valor de los qubits.

> Es como si estuvieras intentando hacer un complejo rompecabezas. en la oscuridad con tus manos atado a la espalda.
>
> **Brian Clegg**
>
> **Escritor científico británico sobre computación cuántica.**

David Deutsch

Nacido en Haifa, Israel, en 1953, David Deutsch es uno de los pioneros de la computación cuántica. Estudió física en el Reino Unido, en Cambridge y Oxford. Luego pasó varios años trabajando en Estados Unidos en la Universidad de Texas en Austin, antes de regresar a la Universidad de Oxford. alemán es un
Miembro fundador del Centro de Computación Cuántica de la Universidad de Oxford.

En 1985, Deutsch escribió un artículo innovador, "Teoría cuántica, la
El principio de Church-Turing y la computadora cuántica universal", que expuso sus ideas para una computadora cuántica universal. Su descubrimiento de los primeros algoritmos cuánticos, su teoría de las puertas lógicas cuánticas y sus ideas sobre las redes computacionales cuánticas se encuentran entre los avances más importantes en este campo.

Trabajos clave

1985"Teoría cuántica, el principio de Church-Turing y la computadora cuántica universal",*Actas de la Royal Society*
1997*El tejido de la realidad*
2011*El comienzo del infinito*

NUCLEAR

PARTÍCULA

dentro del átomo

Y

FÍSICA

1896 — Henri Becquerel descubre que **algunos átomos** emitir **radiación espontáneamente**.

1897 — JJ Thomson descubre el **primer subatómico partícula**: **el electrón**.

1911 — Los experimentos de El físico alemán Hans. Geiger y británico físico Ernest Marsden conducir al descubrimiento de el **núcleo atómico**.

1912 — El físico austriaco Victor Hess descubre la existencia de **rayos cósmicos** midiendo **ionización** tasas desde un globo atmosférico.

1919 — Estudios de Ernest Rutherford. el núcleo de hidrógeno, un **cargado positivamente partícula** Se encuentra en cada núcleo atómico. el lo hará luego dóblalo como **protón**.

1928 — El físico británico Paul Dirac propone un mundo espejo de **antimateria** y un electrón cargado positivamente, posteriormente nombrado el **positrón**.

1932 — James Chadwick descubre el eléctricamente neutral **partículas de neutrones** que existen dentro núcleos atómicos.

La idea de los átomos como pequeñas partículas de materia se remonta al mundo antiguo, su naturaleza aparentemente indivisible consagrada en su nombre griego *átomos* ("incortable"). El físico británico John Dalton, que propuso su teoría atómica en 1803, seguía convencido de su naturaleza indestructible, al igual que la mayoría de los científicos del siglo XIX. Sin embargo, a finales de la década de 1890, algunos investigadores comenzaron a cuestionar esta opinión.

En 1896, el físico francés Henri Becquerel descubrió por casualidad, mientras experimentaba con rayos X, que la sal de uranio que recubría su placa fotográfica emitía radiación de forma espontánea. Un año después, el físico británico JJ Thomson dedujo que los rayos que produjo en un experimento con rayos catódicos estaban formados por partículas cargadas negativamente.

partículas más de mil veces más ligeras que un átomo de hidrógeno; Estas partículas subatómicas fueron posteriormente denominadas electrones.

Explorando el núcleo

Marie Curie, alumna de Becquerel, propuso que tales rayos procedían del interior del átomo, en lugar de ser el resultado de reacciones químicas, una indicación de que los átomos contenían partículas más pequeñas. En 1899, el físico neozelandés Ernest Rutherford confirmó que existen diferentes tipos de radiación.

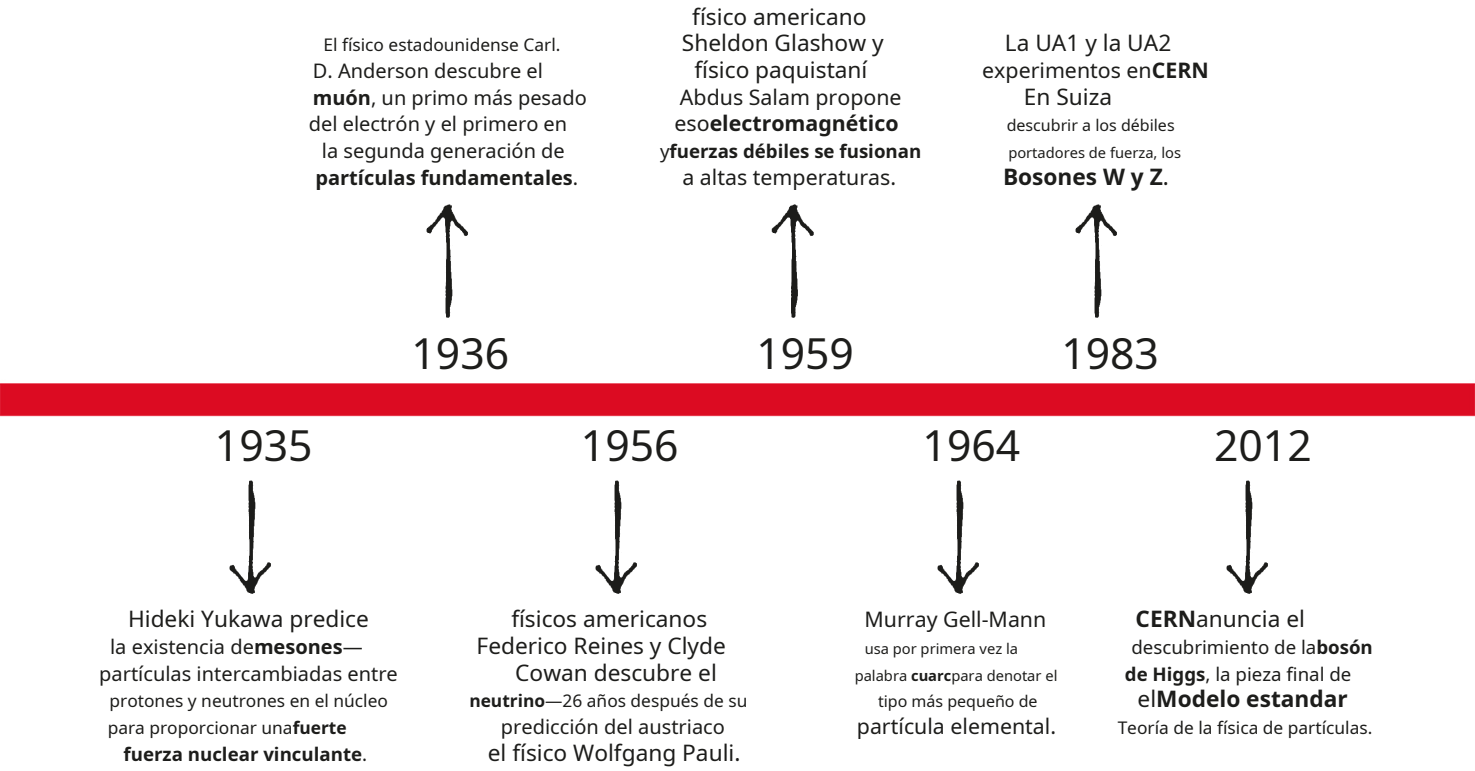
Nombró dos: rayos alfa, que luego reconoció que eran átomos de helio cargados positivamente, y rayos beta, electrones cargados negativamente. En 1900, el científico francés Paul Villard descubrió una luz de alta energía, a la que Rutherford llamó rayos gamma para completar el trío.

de partículas subatómicas que nombró por las tres primeras letras del alfabeto griego.

Rutherford y otros físicos utilizaron partículas alfa como pequeños proyectiles, disparándolas contra los átomos para buscar estructuras más pequeñas. La mayoría atravesó los átomos, pero una pequeña fracción rebotó casi por completo hacia atrás en la dirección desde la que fueron disparados. La única explicación posible parecía ser que una región densamente empaquetada de carga positiva dentro del átomo los repele. El físico danés Niels Bohr trabajó con Rutherford para producir, en 1913, un nuevo modelo de un átomo con núcleo eléctricamente positivo rodeado de luz.

electrones, orbitando como planetas.

Investigaciones posteriores llevaron a los físicos a sugerir que deben existir otras partículas para formar la masa.



del núcleo: el descubrimiento de los protones por Rutherford en 1919 proporcionó la carga eléctrica positiva, mientras que los neutrones eléctricamente neutros fueron identificados por el físico británico James Chadwick en 1932.

Más partículas reveladas

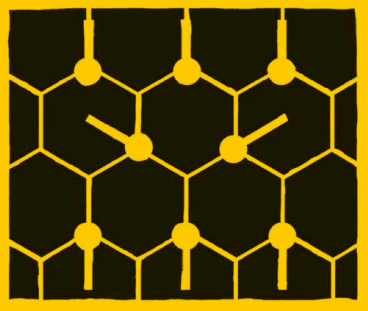
Entre los siguientes enigmas a resolver estaba el de por qué los protones cargados positivamente dentro de un núcleo no lo separaban. El físico japonés Hideki Yukawa dio una respuesta en 1935, proponiendo que una fuerza de alcance ultracorto (la fuerza nuclear fuerte), transportada por una partícula llamada mesón, los mantenía unidos.

Cuando se lanzaron dos bombas nucleares sobre Japón para poner fin a la Segunda Guerra Mundial en 1945, la fuerza letal de la energía nuclear quedó claramente clara. Sin embargo, su uso en tiempos de paz para producir energía doméstica también se convirtió en un realidad cuando los primeros reactores nucleares comerciales se abrieron en los EE.UU. y el Reino Unido en la década de 1950.

Mientras tanto, la investigación de partículas continuó y aceleradores de partículas cada vez más potentes descubrieron una gran cantidad de nuevas partículas, incluidos kaones y bariones, que se desintegraban más lentamente de lo esperado. Varios científicos, incluido el físico estadounidense Murray Gell-Mann, denominaron "extrañeza" a esta cualidad de la desintegración prolongada y la utilizaron para clasificar las partículas subatómicas que la exhiben en grupos familiares, según sus propiedades. Más tarde, Gell-Mann acuñó el nombre de quark para los constituyentes que determinaban tales propiedades y estableció diferentes "sabores" de quarks: inicialmente quarks arriba, abajo y extraños. Los quarks Charm, Top y Bottom llegaron más tarde.

El neutrino, propuesto por primera vez en 1930 para explicar la energía faltante de la radiación beta, fue detectado en 1956. Se detectaron versiones más pesadas del electrón y quarks; A partir de sus interacciones, los físicos comenzaron a reconstruir una imagen de cómo estas partículas intercambiaban fuerzas y cambiaban de un tipo a otro. También se descubrieron los intermediarios que hicieron que todo sucediera (los bosones portadores de fuerza), y el bosón de Higgs completó el cuadro en 2012.

Sin embargo, el modelo estándar (la teoría que explica las cuatro fuerzas básicas, los portadores de fuerzas y las partículas fundamentales de la materia) tiene limitaciones conocidas. La física de partículas moderna está empezando a superar estos límites en busca de materia oscura, energía oscura y una pista sobre el origen de la materia misma.



LA MATERIA NO ES INFINITAMENTE DIVISIBLE

TEORÍA ATÓMICA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
John Dalton(1766–1844)

ANTES
C. 400antes de Cristo Los antiguos filósofos griegos Leucipo y Demócrito teorizan que todo está compuesto de átomos "incortables".

1794químico francés
Joseph Proust encuentra que los elementos siempre se unen en las mismas proporciones para formar compuestos.

DESPUÉS
1811 El químico italiano Amedeo Avogadro propone que los gases están compuestos de moléculas de dos o más átomos, haciendo una distinción entre átomos y moléculas.

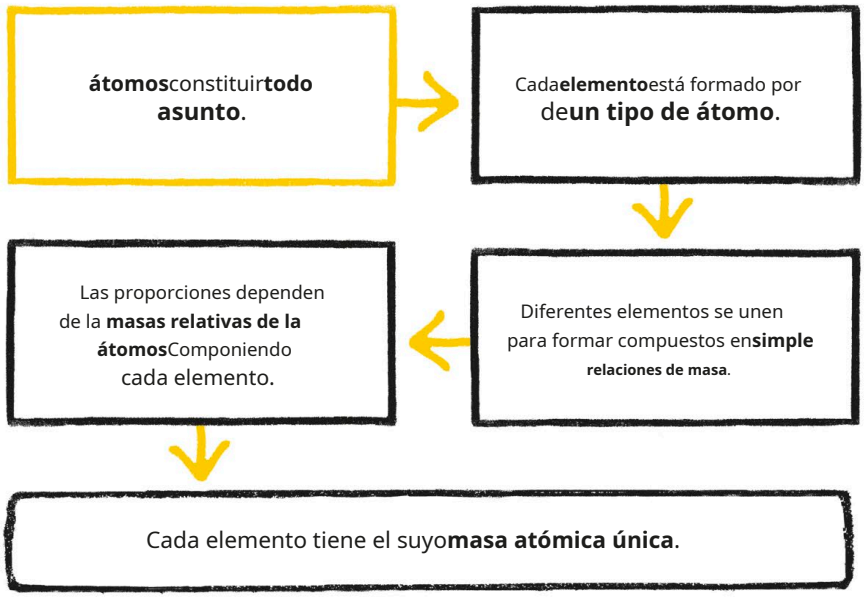
1897físico británico JJ Thomson descubre el electrón.

1905 Albert Einstein utiliza las matemáticas para proporcionar evidencia para la teoría de Dalton.

El concepto de átomo se remonta al mundo antiguo. Los filósofos griegos Demócrito y Leucipo, por ejemplo, propusieron que los "átomos" eternos (de*átomos*, que significa incortable) constituyen toda la materia. Estas ideas revivieron en Europa en los siglos XVII y XVIII cuando los científicos experimentaron combinando elementos para crear otros materiales. Se alejaron de los modelos históricos de cuatro o cinco elementos (generalmente tierra, aire, fuego y agua) y elementos categorizados como oxígeno, hidrógeno, carbono y otros, pero

Todavía tenía que descubrir qué hacía que cada uno fuera único.

La teoría de Dalton.
La explicación llegó con la teoría atómica, desarrollada a principios del siglo XIX por el científico británico John Dalton. Dalton propuso que si el mismo par de



Ver también: Modelos de materia 68–71 · Luz del átomo 196–199 · Partículas y ondas 212–215 · El núcleo 240–241 · Partículas subatómicas 242–243 · Antimateria 246 · Bombas nucleares y energía 248–251

Los elementos podrían combinarse de diferentes maneras para formar diferentes compuestos, la proporción de las masas de estos elementos podría representarse con números enteros. Observó, por ejemplo, que la masa de oxígeno en el agua pura era casi ocho veces la masa del hidrógeno, por lo que lo que formaba oxígeno debía pesar más que lo que formaba hidrógeno. (Más tarde se demostró que un átomo de oxígeno pesa 16 veces más que un átomo de hidrógeno; dado que una molécula de agua contiene un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno, esto encaja con el descubrimiento de Dalton).

Dalton concluyó que cada elemento estaba compuesto por sus propias partículas únicas: los átomos. Estos podían unirse o separarse de otros átomos, pero no podían dividirse, crearse o separarse. destruido. "Ninguna nueva creación o destrucción de materia está al alcance de la acción química", escribió. "Tanto podríamos intentar introducir un nuevo planeta en el sistema solar, o aniquilar uno que ya existe, como crear o destruir una partícula de hidrógeno". Sin embargo, la materia podría cambiarse separando partículas que se combinan y uniéndolas a otras partículas para formar nuevos compuestos.

El modelo de Dalton hizo predicciones precisas y verificables y marcó la primera vez que se utilizó la experimentación científica para demostrar la teoría atómica.

John Dalton usó bolas de madera en demostraciones públicas de su teoría de los átomos. Imaginó los átomos como esferas duras y consistentes.

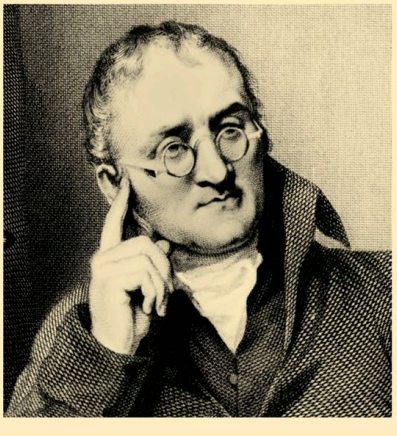
Evidencia matemática

La evidencia que respalda la teoría de Dalton surgió en 1905 cuando un joven Albert Einstein publicó un artículo explicando el movimiento errático de las partículas de polen en el agua: el llamado movimiento browniano. descrito en 1827 por el botánico escocés Robert Brown.

Einstein utilizó las matemáticas para describir cómo el polen era bombardeado por moléculas de agua individuales. Aunque el movimiento aleatorio general de estos muchos Como no se podían ver las moléculas de agua, Einstein propuso que ocasionalmente un pequeño grupo se movía principalmente en la misma dirección y que esto era suficiente para "empujar" un grano de polen. La descripción matemática de Einstein del movimiento browniano hizo posible calcular el tamaño de un átomo o molécula en función de la velocidad a la que se movía el grano de polen.

Si bien los avances científicos posteriores revelaron que había más dentro del átomo de lo que Dalton jamás podría haber imaginado, su teoría atómica sentó las bases para la química y muchas áreas de la física.

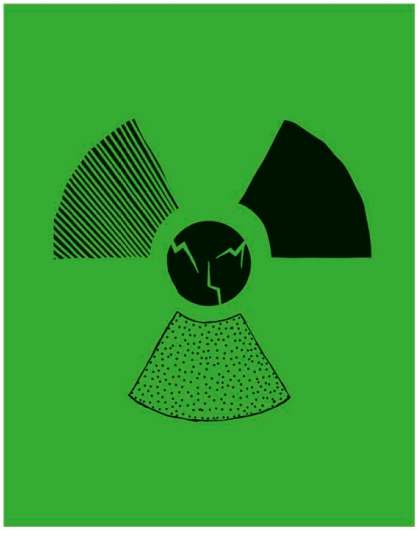
John Dalton



John Dalton nació en 1766 en el Distrito de los Lagos de Inglaterra en una familia cuáquera pobre. Comenzó a trabajar para mantenerse a la edad de 10 años y aprendió ciencias y matemáticas por su cuenta. Comenzó a enseñar en el New College de Manchester en 1793 y propuso una teoría (posteriormente refutada) sobre la causa del daltonismo, una condición que compartía con su hermano. En 1800, se convirtió en secretario de la Sociedad Filosófica y Literaria de Manchester y escribió ensayos influyentes que describen sus experimentos con gases. También era un ávido meteorólogo. Se convirtió en un científico de alto perfil y dio conferencias en la Royal Institution de Londres. Tras su muerte en 1944, se le concedió un funeral público con todos los honores.

Trabajos clave

1806 *Investigación experimental sobre la proporción de diversos gases o fluidos elásticos. Constituyendo la atmósfera* **1808 y 1810** *Un nuevo sistema de filosofía química, 1 y 2*



UN VERDADERO TRANSFORMACIÓN DE IMPORTANCIA

RAYOS NUCLEARES

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Marie Curie(1867-1934)

ANTES

1857 El francés Abel Niepce de Saint-Victor observa que ciertas sales pueden exponer una placa fotográfica en la oscuridad.

1896 Henri Becquerel descubre que el uranio
Las sales pueden emitir radiación sin haber sido expuesto a la luz solar.

1897JJ Thomson, físico británico, descubre el electrón.

DESPUÉS

1898 Marie y Pierre Curie descubren el polonio y el radio radiactivos.

1900 Paul Villard descubre la radiación gamma.

1907 Ernesto Rutherford identifica la radiación alfa como un átomo de helio ionizado.

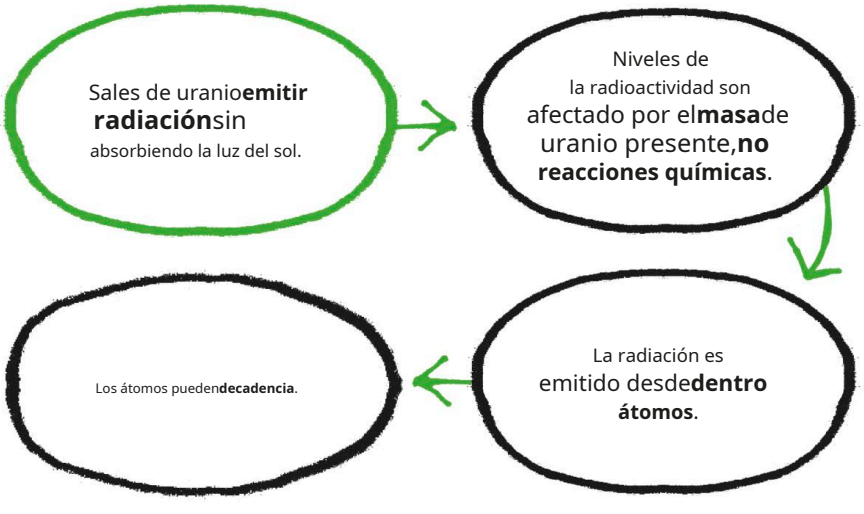
Ud. Hast finales del siglo XIX, los en ficos creían que la m dia emitía radiación. (como la luz visible y ultravioleta) sólo cuando se estimulan, como por ejemplo mediante calentamiento. Esto cambió en 1896, cuando el físico francés Henri Becquerel realizó un experimento con un tipo de radiación recién descubierto: los rayos X. Esperaba descubrir que las sales de uranio emiten radiación como resultado de la absorción de la luz solar. Sin embargo, nublado

El clima en París lo obligó a suspender el experimento y dejó una placa fotográfica envuelta.

recubierto con una sal de uranio (uranilsulfato de potasio) en un cajón. A pesar de permanecer en la oscuridad, se desarrollaron fuertes contornos de la muestra en la placa. Becquerel concluyó que la sal de uranio emitía radiación por sí sola.

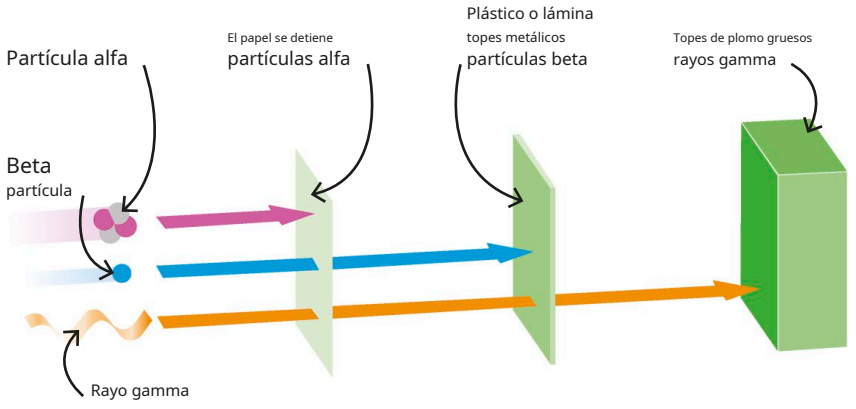
Conocimientos radiactivos

Marie Curie, estudiante de doctorado de Becquerel, se dedicó a estudiar este fenómeno (que más tarde denominó radiactividad) con su marido Pierre. En 1898 extrajeron dos nuevos materiales radiactivos.



Ver también: Partículas y ondas 212–215 · El núcleo 240–241 Subatómico partículas 242–243 Bombas nucleares y energía 248–251

Hay muchos tipos diferentes de radiación., cada uno con propiedades únicas. Ernest Rutherford identificó la radiación alfa y beta; Paul Villard descubrió la radiación gamma.



elementos, polonio y radio, del mineral de uranio. Marie notó que el nivel de actividad eléctrica en el aire que rodeaba el mineral de uranio estaba asociado únicamente con la masa de sustancia radiactiva presente. Postuló que la radiación no era causada por reacciones químicas sino que provenía del interior de los átomos, una teoría audaz cuando la ciencia todavía sostenía que los átomos no se podían dividir.

Se descubrió que la radiación producida por el uranio era el resultado de la "desintegración" de átomos individuales. No hay forma de predecir cuándo se desintegra un átomo individual. En cambio, los físicos miden el tiempo que tarda la mitad de los átomos de una muestra en desintegrarse; esta es la vida media de ese elemento y puede ser desde un instante hasta miles de millones de años. Este concepto de vida media fue propuesto por el físico neozelandés Ernest Rutherford.

En 1899, Rutherford confirmó las sospechas planteadas por Becquerel y Curie de que existen diferentes categorías de radiación. Nombró y describió dos: alfa y beta.

Las emisiones alfa son átomos de helio cargados positivamente y no pueden penetrar más de varios centímetros de aire; Las emisiones beta son corrientes de electrones cargados negativamente que pueden bloquearse mediante una lámina de aluminio. La radiación gamma (descubierta por el químico francés Paul Villard en 1900 como un rayo de alta frecuencia) es eléctricamente neutra. Se puede bloquear con varios centímetros de plomo.

Elementos cambiantes

Rutherford y su colaborador Frederick Soddy descubrieron que la radiación alfa y beta estaban relacionadas con cambios subatómicos: los elementos se transmutan (cambian de un elemento a otro) mediante la desintegración alfa. El torio, por ejemplo, se transformó en radio. Publicaron su ley del cambio radiactivo en 1903.

Esta serie de rápidos descubrimientos anuló el antiguo concepto del átomo indivisible, lo que llevó a los científicos a explorar su interior y establecer nuevos campos de la física y tecnologías que cambiarán el mundo.

Marie Curie

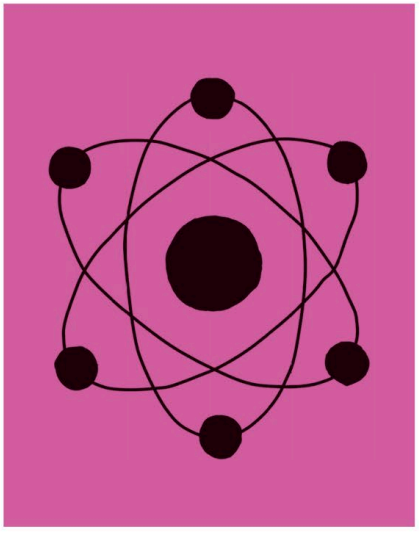
Marie Curie (de soltera Skłodowska) nació en Varsovia, Polonia, en 1867, en una familia de profesores en apuros. Viajó a Francia en 1891 y se matriculó en la Universidad de París, donde conoció a su futuro colaborador y marido, Pierre Curie. Los Curie compartieron el Premio Nobel de Física con Henri Becquerel en 1903. En 1911, Marie recibió el Premio Nobel de Química.

Más adelante en su vida, Curie dirigió el Instituto del Radio en París y desarrolló y organizó unidades móviles de rayos X que se utilizaron para tratar a más de un millón de soldados en la Primera Guerra Mundial. Formó parte del comité de asuntos académicos de la Sociedad de Naciones.

cooperación con Albert Einstein. Murió en 1934 por complicaciones que probablemente fueron causadas por la exposición de toda la vida a la radiactividad.

Trabajos clave

1898 *Sobre una nueva sustancia radiactiva contenida en pechblenda*
1898 *Rayos emitidos por compuestos de uranio y de torio.*
1903 *Investigación sobre sustancias radiactivas.*



EL CONSTITUCIÓN DE IMPORTANCIA

EL NÚCLEO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Ernesto Rutherford
(1871-1937)

ANTES
1803 John Dalton propone la teoría atómica, afirmando que toda la materia está compuesta de átomos.

1903 William Crookes, químico y físico británico, inventa el espintariscopio para detectar radiaciones ionizantes.

1904JJ Thomson propone el modelo del átomo en forma de "pudín de ciruelas".

DESPUÉS
1913 El físico danés Niels Bohr desarrolla un nuevo modelo del átomo, en el que los electrones viajan en órbitas alrededor del núcleo central y pueden moverse entre órbitas.

1919 Ernesto Rutherford informa que el núcleo de hidrógeno (protón) está presente en otros núcleos.

t Los descubrimientos del electrón y de la radiación que emana de su interior. Los átomos a finales del siglo XIX plantearon la necesidad de un modelo atómico más sofisticado que el que se había descrito anteriormente.

En 1904, el físico británico JJ Thomson, que había descubierto el electrón en 1897, propuso el modelo del átomo en forma de "pudín de ciruela". En este modelo, los electrones cargados negativamente están dispersos a lo largo de un átomo mucho más grande y cargado positivamente, como los frutos secos en un postre navideño. Cuatro años más tarde, el físico neozelandés Ernest Rutherford comenzó a desmantelar el modelo del pudín de ciruelas mediante una serie de pruebas realizadas en su laboratorio de Manchester con Ernest Marsden y Hans Geiger. Se conoció como el experimento de la lámina de oro.

> Cuando hayamos descubierto cómo
> Una vez formado el núcleo de los átomos, habremos encontrado el mayor secreto.
> de todo, excepto de la vida.
> **Ernesto Rutherford**

Partículas parpadeantes

Rutherford y sus colegas observaron el comportamiento de la radiación alfa dirigida a una fina lámina de oro, de sólo 1.000 átomos de espesor. Dispararon un haz estrecho de partículas alfa a la lámina desde una fuente radiactiva que estaba rodeada por un escudo de plomo. La lámina de oro estaba rodeada por una pantalla recubierta de sulfuro de zinc que emitía un pequeño destello de luz (centelleo) cuando era golpeada por las partículas alfa. Usando un microscopio, los físicos pudieron observar cómo las partículas alfa golpeaban la pantalla. (La configuración era similar a un espintariscopio, desarrollado por William Crookes en 1903 para detectar radiación).

Geiger y Marsden notaron que la mayoría de las partículas alfa atravesaron la lámina de oro, lo que implica que (en contradicción con el modelo de Thomson) la mayor parte de un átomo era espacio vacío. una pequeña fracción

Ver también: Modelos de materia 68–71 · Teoría atómica 236-237 · rayos nucleares 238–239 · Partículas subatómicas 242–243 · Bombas nucleares y energía 248–251

de las partículas alfa se desvió en grandes ángulos y algunas incluso rebotaron hacia la fuente. Aproximadamente una de cada 8.000 partículas alfa se desvió en un ángulo medio de 90 grados. Rutherford quedó atónito por lo que él y sus colegas observaron: parecía que estas partículas eran repelidas eléctricamente por una carga pequeña, pesada y positiva dentro de los átomos.

Un nuevo modelo del átomo.

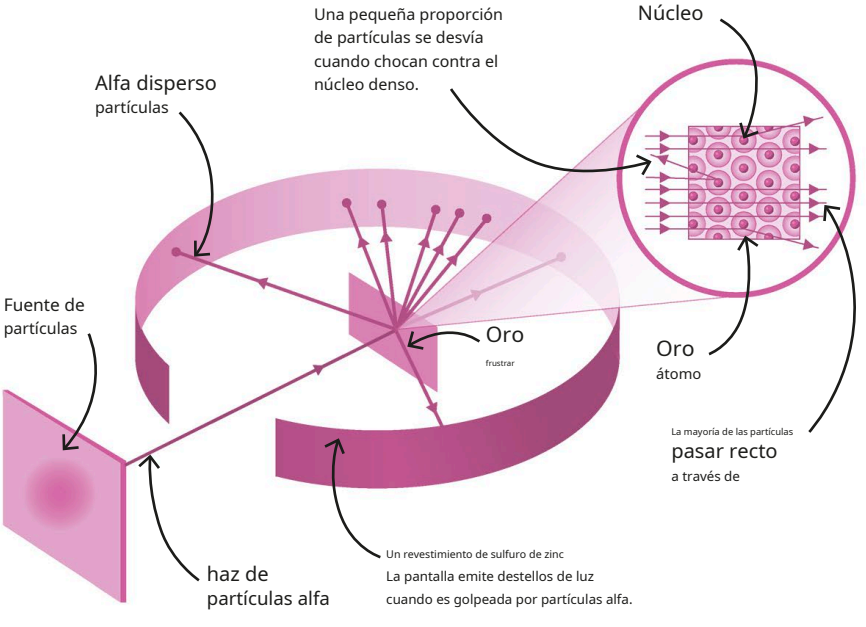
Los resultados del experimento de la lámina de oro formaron la base del nuevo modelo atómico de Rutherford, que publicó en 1911. Según este modelo, la gran mayoría de la masa de un átomo se concentra en un núcleo cargado positivamente llamado núcleo. Este núcleo está orbitado por electrones que están unidos eléctricamente a él.

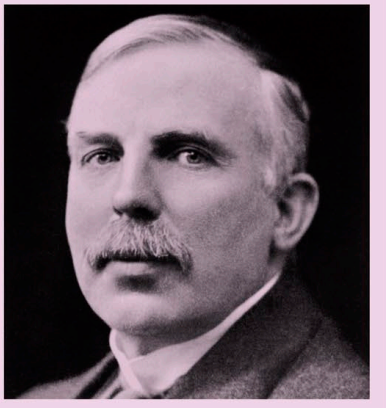
El modelo de Rutherford tenía algunas similitudes con el modelo saturniano del átomo propuesto por el físico japonés Hantaro Nagaoka en 1904. Nagaoka había descrito electrones que giraban alrededor de un centro cargado positivamente, algo parecido a los anillos helados de Saturno.

Sin embargo, la ciencia es un proceso iterativo, y en 1913, Rutherford desempeñó un papel importante al reemplazar su propio modelo del átomo por uno nuevo que incorporaba la mecánica cuántica en su descripción del comportamiento de los electrones. Este fue el modelo de Bohr, que fue desarrollado con Niels Bohr y tenía electrones orbitando en diferentes "capas".

En cualquier caso, el descubrimiento del núcleo atómico por parte de Rutherford se considera ampliamente como uno de los más descubrimientos importantes en física, sentando las bases para la física nuclear y de partículas.

El experimento de la lámina de oro





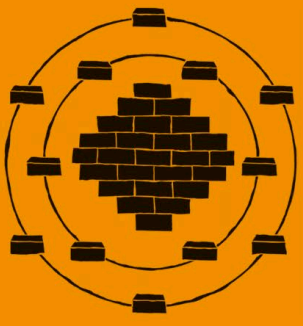
Ernesto Rutherford

Ernest Rutherford nació en Brightwater, Nueva Zelanda. En 1895, ganó una beca que le permitió viajar a la Universidad de Cambridge, Reino Unido, y trabajar con JJ Thomson en su Laboratorio Cavendish. Mientras estuvo allí, encontró una manera de transmitir y recibir ondas de radio a largas distancias, independientemente del inventor italiano Guglielmo Marconi.

Rutherford se convirtió en profesor en la Universidad McGill en Canadá en 1898, pero regresó al Reino Unido en 1907, esta vez a Manchester, donde realizó su investigación más famosa. Recibió el Premio Nobel de Física en 1908. Más adelante, se convirtió en director del Laboratorio Cavendish y presidente de la Royal Society. Tras su muerte, se le concedió el honor de un entierro en Abadía de Westminster.

Trabajos clave

1903 "Cambio radiactivo" **1911** "La dispersión de partículas alfa y beta por la materia y la estructura del átomo" **1920** "Constitución nuclear de los átomos"



LOS LADRILLOS DE QUÉ ÁTOMOS

ESTÁN CONSTRUIDOS

PARTÍCULAS SUBATÓMICAS

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES

Ernesto Rutherford (1871-1937),**Jaime chadwick**(1891-1974)

ANTES

1838 El químico británico Richard Laming sugiere que Existen partículas subatómicas.

1891 El físico irlandés George J. Stoney denomina "electrón" a la unidad fundamental de carga.

1897JJ Thomson proporciona evidencia a favor del electrón.

DESPUÉS

1934 El físico italiano Enrico Fermi bombardea uranio con neutrones, produciendo un elemento nuevo y más ligero.

1935 James Chadwick recibe el Premio Nobel por su descubrimiento del neutrón.

1938 La física austriaca Lise Meitner lleva el descubrimiento de Fermi más allá y describe la fisión nuclear.

Durante milenios, se pensaba que los átomos eran unidades irrompibles. Una sucesión de descubrimientos realizados por tres generaciones de físicos de Cambridge desmantelaron esta idea y revelaron partículas más pequeñas dentro del átomo.

La primera partícula subatómica fue descubierta en 1897 por el físico británico JJ Thomson mientras experimentaba con rayos catódicos. Estos rayos son producidos por el electrodo negativo (cátodo) de un tubo de vacío cargado eléctricamente y son atraídos por un electrodo positivo (ánodo). Los rayos catódicos hicieron que el vidrio en el extremo más alejado del tubo brillara y Thomson dedujo que los rayos estaban compuestos de partículas cargadas negativamente más de 1.000 veces más ligeras que un átomo de hidrógeno. Concluyó que estas partículas eran una componente universal de los átomos, denominándolos "corpúsculos" (posteriormente llamados electrones).

> "... la radiación se compone de neutrones: partículas de masa 1 y carga 0."
> **James Chadwick**

Profundizando en el átomo

Thomson incorporó electrones en su modelo atómico de "pudín de ciruela" de 1904. Sin embargo, en 1911, el alumno de Thomson, Ernest Rutherford, propuso un nuevo modelo. Este tenía un núcleo denso y cargado positivamente orbitado por electrones.

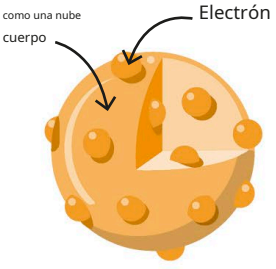
Otros perfeccionamientos realizados por Niels Bohr, junto con Rutherford, produjeron el modelo Bohr en 1913.

En 1919, Rutherford descubrió que cuando el nitrógeno y otros elementos eran impactados por radiación alfa, se emitían núcleos de hidrógeno. Llegó a la conclusión de que el núcleo de hidrógeno (el núcleo más ligero) es un constituyente de todos los demás núcleos y lo llamó protón.

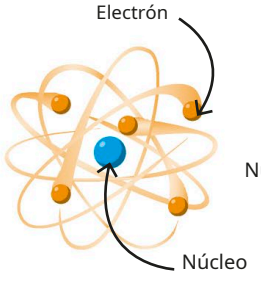
Los físicos lucharon por explicar las propiedades de los átomos sólo con protones y electrones, porque estas partículas representaban sólo la mitad de la masa medida de los átomos. En 1920, Rutherford sugirió que una partícula neutra compuesta

Ver también: Modelos de materia 68–71 · Carga eléctrica 124–127 · Luz del átomo 196–199 · Partículas y ondas 212–215 · El núcleo 240–241 · Bombas nucleares y energía 248–251 · El zoológico de partículas y los quarks 256-257

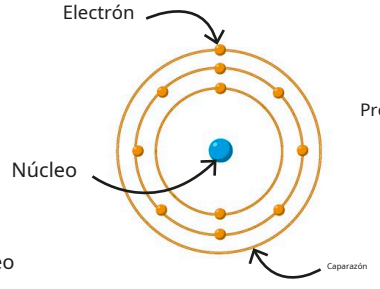
Modelos del átomo



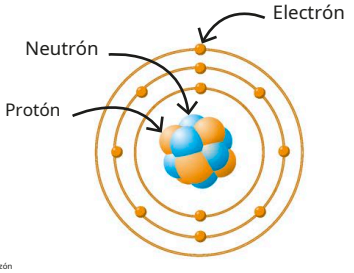
pudín de ciruelas de Thomson modelo(1904) tiene electrones punteados aleatoriamente en una átomo cargado positivamente.



En el modelo de Rutherford (1911), los electrones giran alrededor de un núcleo denso y cargado positivamente.



El modelo de Niels Bohr (1913) tiene electrones orbitando el núcleo en las capas interna y externa.



En 1932, James Chadwick Descubrió que el núcleo de un átomo está formado por protones y neutrones.

de un protón y un electrón unidos, al que llamó neutrón, pueden existir dentro de los núcleos. Si bien esto ofrecía una simple

Para explicar cómo los electrones irradian desde los núcleos, violaba los principios de la mecánica cuántica: simplemente no había suficiente energía para atrapar electrones dentro de los núcleos.

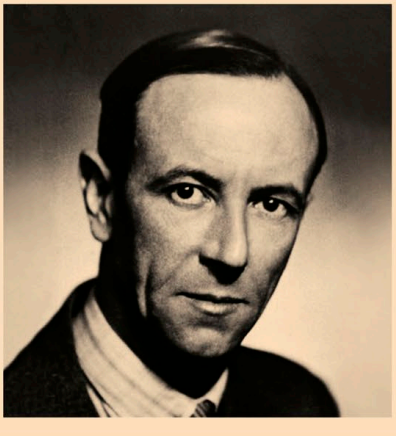
En París, en 1932, Irène Joliot-Curie y su marido Frédéric experimentaron con una nueva

Descubrió un tipo de radiación neutra (que se cree que es una forma de radiación gamma), que surgió cuando la radiación alfa incide sobre elementos ligeros como el berilio. Los Joliot-Curie descubrieron que esta radiación transportaba suficiente energía para expulsar protones de alta energía de compuestos ricos en hidrógeno. Pero ni Rutherford ni James Chadwick, antiguo alumno de Rutherford, creían que se tratara de rayos gamma. Chadwick repitió

los experimentos con mediciones más precisas. Demostró que esta radiación tenía aproximadamente la misma masa que los protones y concluyó que esta nueva radiación estaba compuesta de neutrones (partículas neutras).

contenida en el núcleo. Este descubrimiento completó el modelo atómico de una manera que tenía sentido. También puso en marcha el desarrollo de nuevas tecnologías médicas y el inicio de la era nuclear.

James Chadwick



Cuando James Chadwick, nacido en Cheshire, ganó una beca para la Universidad de Manchester, accidentalmente se matriculó en física en lugar de matemáticas. Estudió con Ernesto.

Rutherford y escribió su primer artículo sobre cómo medir la radiación gamma. En 1913, Chadwick viajó a Berlín para estudiar con Hans Geiger, pero fue encarcelado en el campo de detención de Ruhleben durante la Primera Guerra Mundial.

Después de la liberación de Chadwick, se unió a Rutherford en la Universidad de Cambridge en 1919. En 1935, recibió el Premio Nobel de Medicina.

Física para el descubrimiento del neutrón. Durante la Segunda Guerra Mundial, Chadwick dirigió el equipo británico que trabajaba en el Proyecto Manhattan para desarrollar energía nuclear.

armas para los aliados. Posteriormente se desempeñó como asesor científico británico de la Comisión de Energía Atómica de la ONU.

Trabajos clave

1932 "Posible existencia de un neutrón"
1932 "La existencia de un neutrón"

PEQUEÑOS BRAZOS DE NUBE

PARTÍCULAS EN LA CÁMARA DE NUBE

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Carlos TR Wilson
(1869-1959)

ANTES

1894 Charles TR Wilson crea nubes en cámaras mientras estudia fenómenos meteorológicos en el observatorio Ben Nevis, Escocia.

1910 Wilson se da cuenta de que se puede utilizar una cámara de niebla para estudiar partículas subatómicas emitidas por fuentes radiactivas.

DESPUÉS

1912 Victor Hess propone que la radiación ionizante de alta energía ingresa a la atmósfera desde el espacio en forma de "rayos cósmicos".

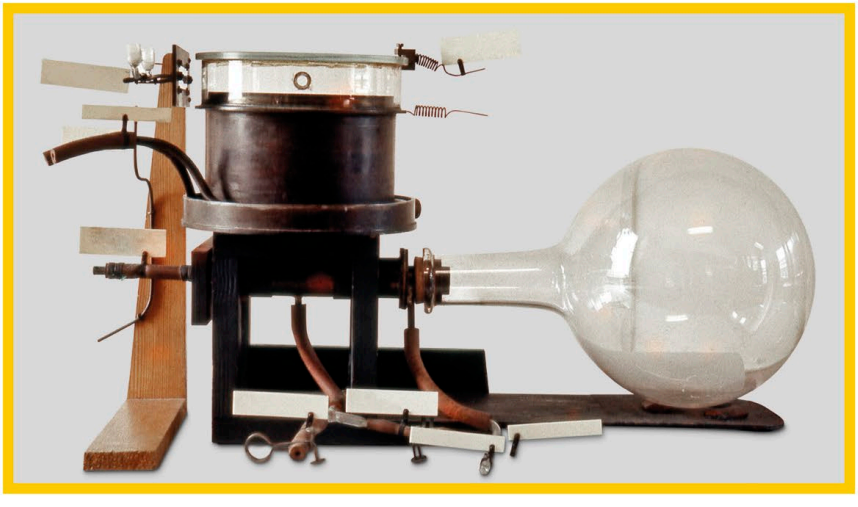
1936 El físico estadounidense Alexander Langsdorf modifica la cámara de niebla añadiendo hielo seco.

1952 La cámara de burbujas reemplaza a la nube.
cámara como herramienta básica en la física de partículas.

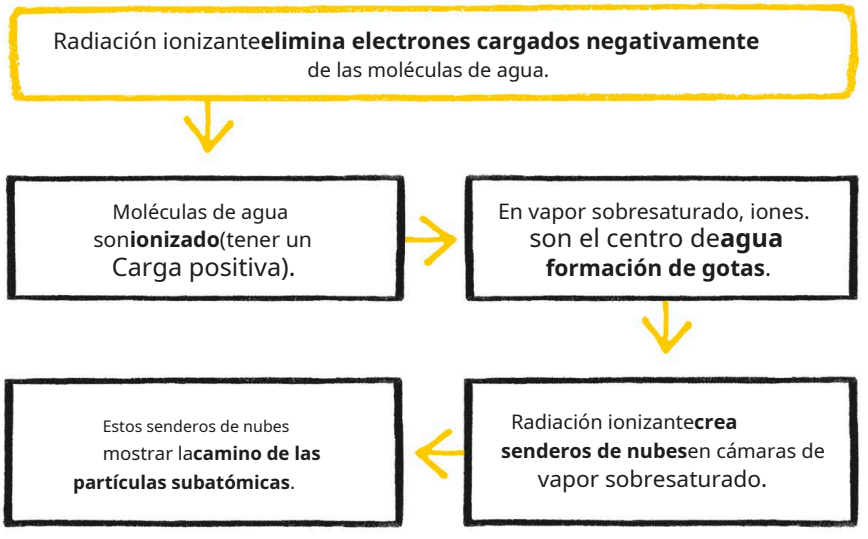
Las partículas ubatómicas son Objetos fantasmales, normalmente visibles sólo a través de sus interacciones. Sin embargo, la invención de la cámara de niebla permitió a los físicos presenciar por primera vez los movimientos de estas partículas y determinar sus propiedades.

Interesado en diseñar una herramienta para estudiar la formación de nubes, el físico y meteorólogo escocés Charles TR Wilson experimentó con expandiendo el aire húmedo en una cámara sellada, volviéndolo sobresaturado. Se dio cuenta de que cuando los iones (átomos cargados) chocan con las moléculas de agua, eliminan los electrones para crear un camino de iones alrededor del cual se forma niebla, y esto deja un rastro visible en la cámara. En 1910, Wilson había perfeccionado su cámara de niebla y la demostró a los científicos en 1911. Combinado con imanes y campos eléctricos, el aparato permitió a los físicos calcular propiedades como la masa y carga eléctrica de los rastros nublados que dejan las partículas. En 1923, añadió la fotografía estereoscópica a

Cámara de niebla de Wilson, expuesto en el museo Cavendish Laboratory de Cambridge, produjo huellas en su interior "tan finas como pelitos".



Ver también: Carga eléctrica 124–127 · Rayos nucleares 238–239 Antimateria 246 · El zoológico de partículas y los quarks 256-257 Portadores de fuerza 258–259



registrarlos. Si bien Wilson observó la radiación de fuentes radiactivas, las cámaras de niebla también se pueden utilizar para detectar rayos cósmicos (radiación procedente de más allá del sistema solar y la Vía Láctea).

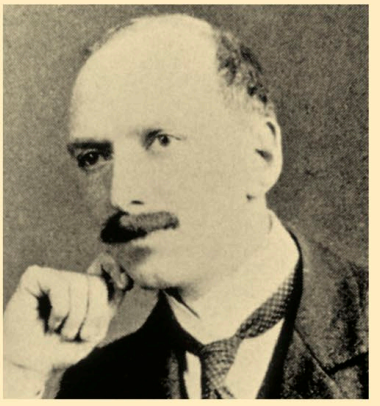
El concepto de rayos cósmicos se confirmó en 1911-1912 cuando el físico Victor Hess midió las tasas de ionización desde un globo atmosférico. Durante los arriesgados ascensos a 17.380 pies (5.300 m), día y noche, encontró niveles elevados de ionización y concluyó: "una radiación de muy alto poder de penetración entra desde arriba en nuestro atmósfera." Estos rayos cósmicos (compuestos en su mayoría por protones y partículas alfa) chocan con los núcleos de los átomos y crean cascadas de partículas secundarias cuando impactan la atmósfera terrestre.

El antielectrón

Mientras investigaba los rayos cósmicos en 1932, el físico estadounidense Carl D. Anderson identificó algo que parecía ser un reflejo exacto de un electrón, de igual masa que una carga igual pero opuesta. Finalmente concluyó que los rastros pertenecían a un antielectrón (el positrón). Cuatro años más tarde, Anderson descubrió otra partícula: el muón. Sus rastros mostraron que era más de 200 veces más pesado que un electrón pero tenía la misma carga. Esto insinuaba la posibilidad de múltiples "generaciones" de partículas unidas por propiedades similares.

Descubrimiento de la fuerza débil

En 1950, físicos de la Universidad de Melbourne encontraron una partícula neutra entre los rayos cósmicos, que se desintegraba en un protón y otros productos. Lo llamaron barión lambda. (L-).Hay varias partículas compuestas de bariones, cada una de las cuales se ve afectada por la fuerza fuerte que actúa dentro del núcleo. Los físicos predijeron que el barión lambda debería desintegrarse en 10^{-23} segundos, pero sobrevivió mucho más. Este hallazgo los llevó a concluir que estaba involucrada otra fuerza fundamental, que actuaba a corta distancia. Se le llamó interacción débil o fuerza débil.



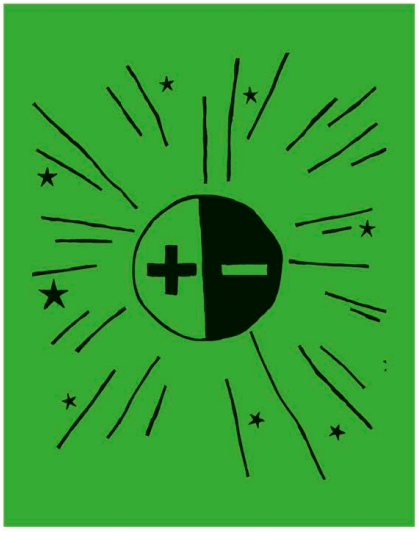
Carlos TR Wilson

Nacido en una familia de agricultores en Midlothian, Escocia, Charles TR Wilson se mudó a Manchester después de la muerte de su padre. Había planeado estudiar medicina, pero ganó una beca para la Universidad de Cambridge y se pasó a las ciencias naturales. Comenzó a estudiar las nubes y trabajó durante algún tiempo en el observatorio meteorológico Ben Nevis, lo que le inspiró a desarrollar la cámara de niebla. En 1927 compartió el Premio Nobel de Física con Arthur Compton por su invención.

A pesar de la enorme Su contribución a la física de partículas, siguió más interesado en la meteorología. Inventó un método para proteger los globos de bombardeo británicos de los rayos durante la Segunda Guerra Mundial y propuso una teoría de la electricidad de las tormentas.

Trabajos clave

1901 *Sobre la ionización del aire atmosférico*
1911 *Sobre un método para hacer visibles los caminos de la ionización Partículas a través de un gas* **1956** *Una teoría de la electricidad de las nubes tormentosas*



OPUESTOS

PUEDE EXPLOTAR

ANTIMATERIA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Pablo Dirac(1902-1984)

ANTES
1898 El físico británico de origen alemán Arthur Schuster especula sobre la existencia de antimateria.

1928 Paul Dirac propone que los electrones podrían tener carga tanto positiva como negativa.

1931 Dirac publica un artículo que predice el "antielectrón" cargado positivamente.

DESPUÉS
1933 Dirac propone el antiprotón, la antimateria equivalente al protón.

1955 Una investigación de la Universidad de California en Berkeley confirma la
El antiprotón existe.

1965físicos del CERN describen la producción de antimateria unida en forma de antideuterio.

En la década de 1920, el físico británico Paul Dirac propuso un mundo espejo de antimateria. En un artículo de 1928, demostró que es igualmente válido que los electrones tengan estados de energía positivos o negativos. Un electrón con energía negativa se comportaría de manera opuesta a un electrón ordinario. Por ejemplo, un protón lo repelería en lugar de atraerlo, por lo que tiene carga positiva.

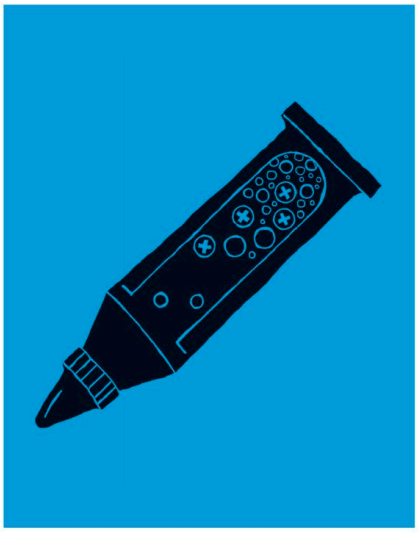
Dirac descartó la posibilidad de que esta partícula fuera un protón, dado que la masa de un protón es mucho mayor que la de un electrón. En cambio, propuso una nueva partícula con la misma masa que un electrón pero con carga positiva. Lo llamó un "antielectrón". Al encontrarse, un electrón y un antielectrón se aniquilarían entre sí, produciendo una masa de energía.

A Carl D. Anderson se le atribuye la confirmación de la existencia de este antielectrón (al que rebautizó como positrón) en 1932. Anderson permitió que los rayos cósmicos pasaran a través de una cámara de niebla bajo la influencia de un campo magnético, lo que provocó que doblarse en diferentes direcciones según su carga. Descubrió una partícula con una trayectoria curva como la de un electrón pero que apuntaba en la dirección opuesta.

Al descubrimiento de Anderson le siguieron otras partículas y átomos de antimateria. Ahora se sabe que todas las partículas tienen una partícula de antimateria equivalente, pero la pregunta de por qué la materia ordinaria es dominante en el universo sigue sin resolverse.

> Creo que el descubrimiento de la antimateria fue quizás el mayor salto de todos los grandes saltos en la física en nuestro siglo.
> **Werner Heisenberg**

Ver también: Partículas subatómicas 242–243 · Partículas en la cámara de niebla 244–245 · El zoológico de partículas y los quarks 256-257 · Asimetría materia-antimateria 264



EN BUSCA DE

PEGAMENTO ATÓMICO

LA FUERZA FUERTE

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Hideki Yukawa(1907-1981)

ANTES
1935 Yukawa predice la existencia de una nueva fuerza dentro del núcleo atómico.

1936 Carl D. Anderson descubre el muón, que durante un tiempo se pensó que era el portador de esta nueva fuerza.

DESPUÉS
1948 Un equipo de físicos de la Universidad de California, Berkeley, produce piones artificialmente disparando partículas alfa a átomos de carbono.

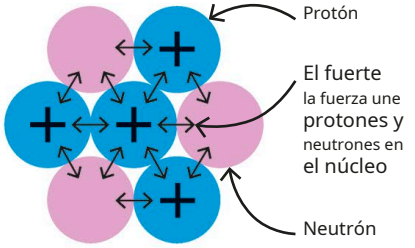
1964 El físico estadounidense Murray Gell-Mann predice la existencia de quarks, que interactúan a través de la fuerza fuerte.

1979 El gluón se descubre en el PETRA (Positron-Electron Tandem Ring Acelerador) partícula acelerador en Alemania.

El descubrimiento de las partículas subatómicas a principios del siglo XX planteó tantas preguntas como respuestas. Una de esas preguntas era ¿cómo se unen los protones cargados positivamente en un núcleo a pesar de su repulsión eléctrica natural?

En 1935, el físico japonés Hideki Yukawa proporcionó una respuesta cuando predijo una fuerza de ultra corto alcance que actúa dentro del núcleo atómico para unir sus átomos.
componentes (protones y neutrones). Dijo que esta fuerza es transportada por una partícula que llamó mesón. De hecho, hay muchos mesones. El primero en ser descubierto fue el pión (o mesón pi), que físicos del Reino Unido y Brasil encontraron en 1947 estudiando los rayos cósmicos que caen sobre los Andes. Sus experimentos confirmaron que el pion era
involucrados en las fuertes interacciones que Yukawa había descrito.

Con mucho, la más fuerte de las cuatro fuerzas fundamentales (las otras son electromagnética, gravitacional y la fuerza débil), esta fuerza fuerte recientemente descubierta.



Neutrones y protones (nucleones) están unidos dentro del núcleo por la fuerte fuerza que transmiten los mesones. Dentro de los protones y neutrones, las partículas más pequeñas (quarks) están unidas por gluones.

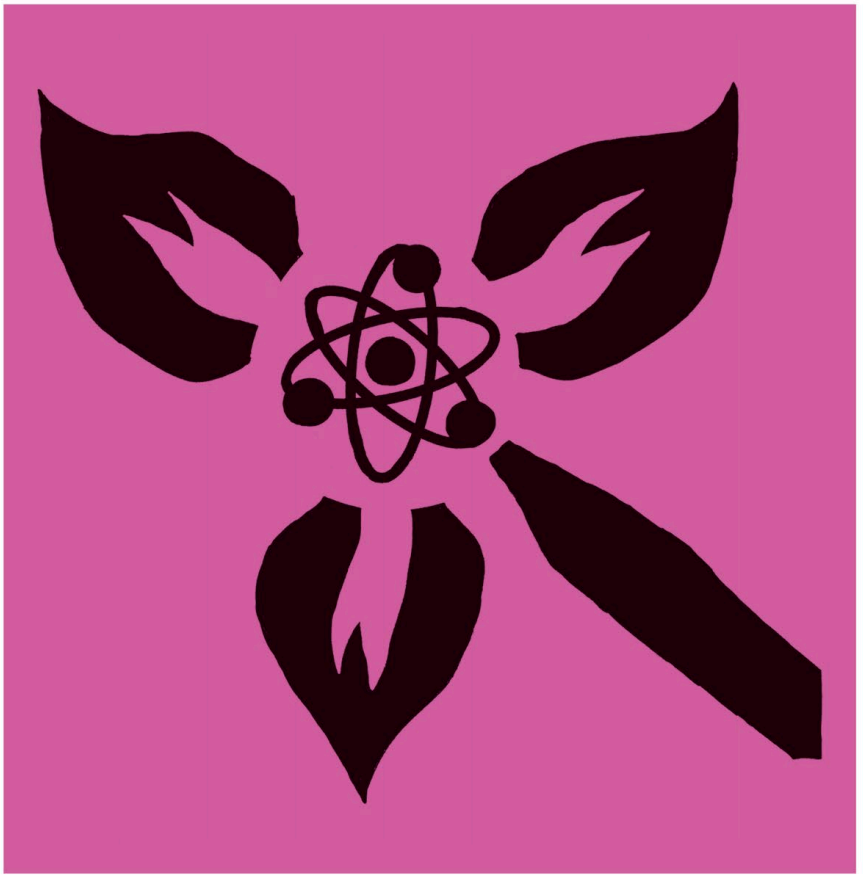
De hecho, es responsable de la enorme energía liberada en las armas nucleares y en los reactores nucleares cuando los átomos se dividen. Los mesones son los portadores de esta fuerza entre los nucleones. La fuerza fuerte entre los quarks (que se combinan de tres en tres para formar un protón) es transportada por los gluones (partículas elementales o bosones), llamados así por su capacidad de "pegar" quarks con diferentes "colores" (una propiedad

sin relación con los colores normales) para formar partículas "incoloras" como protones y piones.

Ver también: El núcleo 240–241 · Partículas subatómicas 242–243 la partícula zoológico y quarks 256–257 Portadores de fuerza 258–259

TERRIBLE CANTIDADES DE ENERGÍA

BOMBAS NUCLEARES Y ENERGÍA



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Enrico Fermi(1901-1954),
Lise Meitner(1878-1968)

ANTES
1898 Marie Curie descubre cómo la radiactividad emana de materiales como el uranio.

1911 Ernesto Rutherford propone que el átomo tiene un núcleo denso en su centro.

1919 Rutherford muestra que un elemento puede transformarse en otro bombardeándolo con partículas alfa.

1932 James Chadwick descubre el neutrón.

DESPUÉS
1945 Se prueba la primera bomba atómica en Nuevo México. Se lanzan bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki.

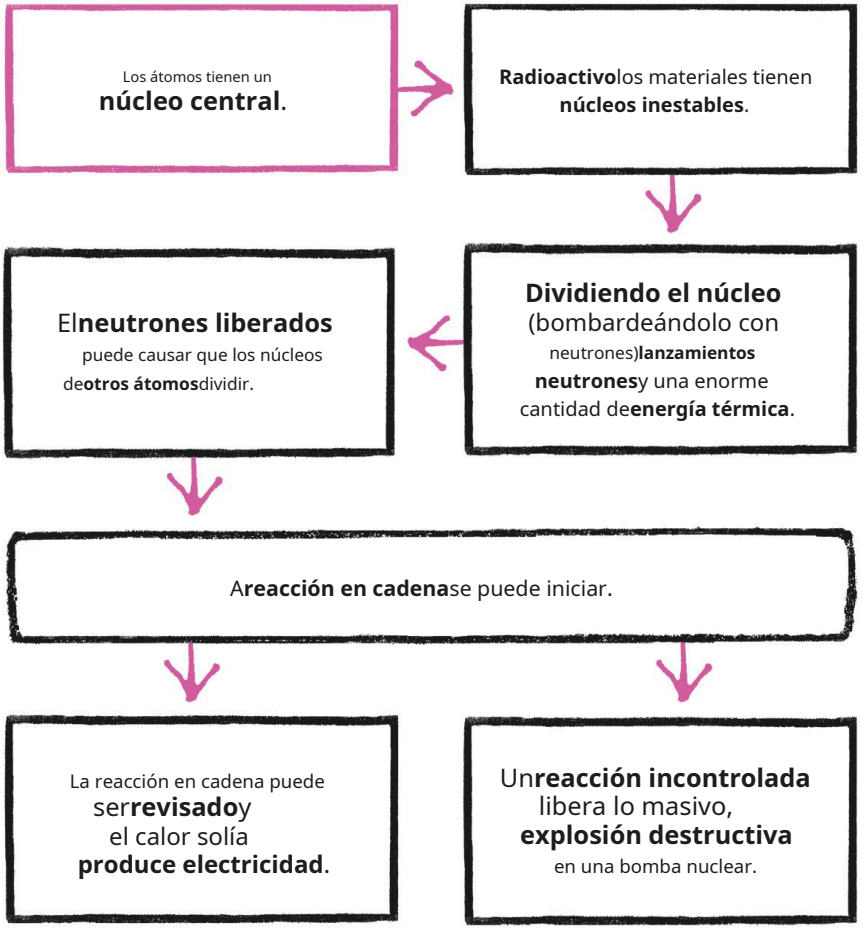
1951 Se inaugura el primer reactor nuclear para generación eléctrica.

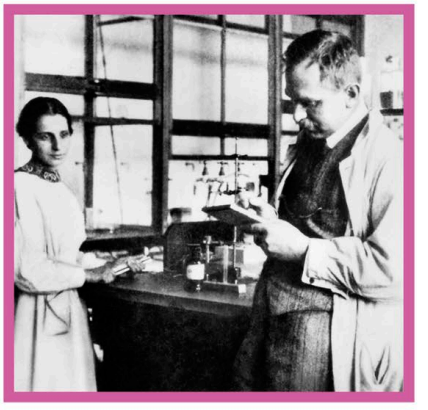
1986 El desastre de Chernobyl pone de relieve los riesgos de la energía nuclear.

A principios del siglo XX, los físicos estaban poniendo sin saberlo la base para que los científicos comprendan y eventualmente aprovechen el inmenso poder atrapado dentro del átomo. En 1911, Ernest Rutherford había propuesto un modelo del átomo que tenía un núcleo denso en su núcleo. En París, Marie Curie y sus colaboradores, incluido su marido Pierre, descubrieron y describieron cómo la radiactividad emanaba del interior del átomo de materiales naturales como el uranio.

Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com

Ver también: Generar electricidad 148–151 · Teoría atómica 236-237 · Rayos nucleares 238–229 El núcleo 240–241 · Partículas subatómicas 242–243





Fotografiado en 1913. Con Otto Hahn en su laboratorio de Berlín, Lise Meitner amplió más tarde el trabajo de Enrico Fermi y explicó la fisión nuclear.

En 1934, el físico italiano Enrico Fermi bombardeó uranio con neutrones (partículas subatómicas descubiertas apenas dos años antes). El experimento de Fermi pareció transformar el uranio en diferentes elementos: no los nuevos y más pesados que esperaba, sino isótopos (variantes con un número de neutrones diferente) de elementos más ligeros. Fermi había dividido lo aparentemente
átomo indivisible, aunque la comunidad científica tardó años en comprender la magnitud de lo que había hecho. La química alemana Ida Noddack sugirió que el nuevo Los elementos eran fragmentos de los núcleos de uranio originales, pero su propuesta fue descartada en la lucha por que los científicos comprendieran el experimento de Fermi.

En 1938, los químicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann ampliaron el trabajo de Fermi. Descubrieron que bombardear uranio con neutrones producía bario, aparentemente perdiendo 100 protones y neutrones en el proceso. Hahn transmitió los desconcertantes hallazgos a su ex colega Lise Meitner, que había huido de la Alemania nazi a Suecia. Meitner propuso que el uranio Los núcleos se estaban rompiendo en fragmentos, en un proceso que Hahn llamó fisión nuclear. Fundamentalmente, Meitner también utilizó la teoría de la equivalencia energíamasa de Albert Einstein (resumida en la ecuación$mi=mc_2$) para mostrar que la masa perdida misteriosamente en el proceso se estaba convirtiendo en energía. Finalmente todas las piezas del rompecabezas encajan.

Fuerzas poderosas

Las fuerzas dentro de un núcleo son poderosas y están precariamente equilibradas. La fuerza nuclear une el núcleo, mientras que los protones cargados positivamente dentro del núcleo se repelen entre sí con aproximadamente 230 N de fuerza. Mantener unido el núcleo requiere una enorme cantidad de "energía de unión", que se libera cuando el núcleo se rompe. La pérdida de masa equivalente es mensurable: en la reacción de fisión del uranio que estamos investigando, alrededor de una quinta parte de la masa de un protón pareció desaparecer en una explosión de calor.

> No existen límites para la destructividad de esta arma... su propia existencia [es] un peligro para la humanidad.
>
> **Enrico Fermi**

Meitner y otros físicos reconocieron que los neutrones "ebullición" de la fisión nuclear abrían la posibilidad de reacciones en cadena en las que los núcleos libres provocaban reacciones de fisión sucesivas, liberando más energía y neutrones en cada reacción. Una reacción en cadena podría liberar un flujo constante de energía o provocar una gran explosión. Mientras las naciones se acercaban a la Segunda Guerra Mundial y temían que este poder pudiera ser utilizado en las manos equivocadas, los investigadores inmediatamente comenzaron a estudiar cómo sostener la fisión.

El proyecto Manhattan

El presidente estadounidense Franklin D. Roosevelt quería que Estados Unidos y sus aliados fueran los primeros en aprovechar la energía atómica mientras el conflicto consumía gran parte del mundo. Aunque Estados Unidos no entró en la Segunda Guerra Mundial hasta el ataque japonés a Pearl Harbor en 1941, el secreto Proyecto Manhattan, que empleó a muchos de los más grandes científicos y matemáticos del siglo XX, se creó en 1939 para desarrollar armas nucleares bajo la dirección científica de J. Robert Oppenheimer.

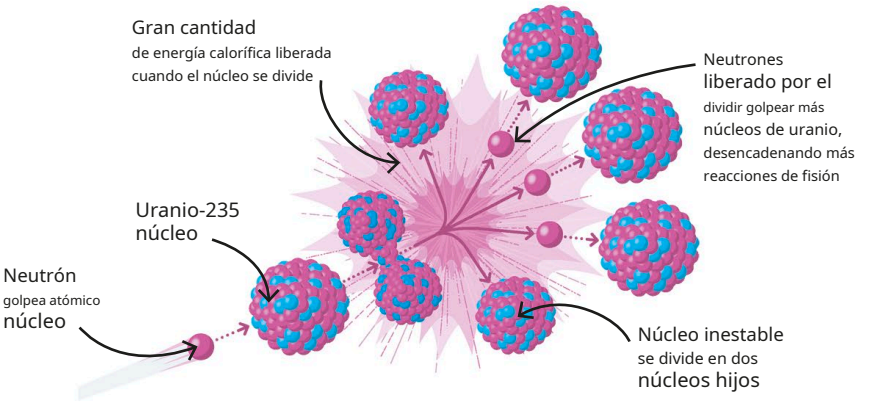
Habiendo huido de la Italia fascista en 1938, Fermi se mudó a los Estados Unidos y reanudó el trabajo en las aplicaciones de su descubrimiento, como parte del Proyecto Manhattan. Él y sus colegas descubrieron que los neutrones (térmicos) de movimiento lento tenían más probabilidades de ser absorbidos por los núcleos y causar fisión. El U-235 (un isótopo natural del uranio) fue identificado como un combustible ideal porque libera tres neutrones térmicos cada vez que se fragmenta. El U-235 es un isótopo raro que constituye menos del 1 por ciento del uranio natural, por lo que el uranio natural debe enriquecerse minuciosamente para sostener una reacción en cadena.

El factor crítico

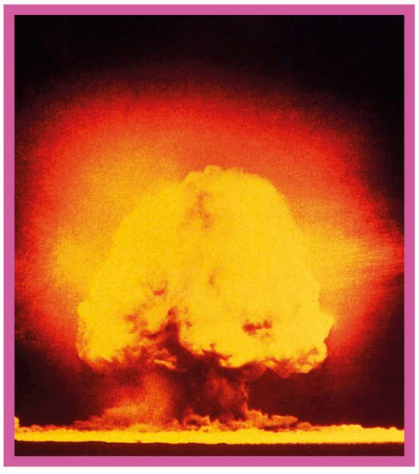
El Proyecto Manhattan persiguió múltiples métodos para enriquecer uranio y dos posibles diseños de reactores nucleares: uno con sede en la Universidad de Columbia que utilizaba agua pesada (agua que contiene un isótopo de hidrógeno) para frenar los neutrones; y un segundo liderado por Fermi en el Universidad de Chicago que utilizó grafito. Los científicos apuntaban a la criticidad, cuando la velocidad a la que se producen neutrones a partir de la fisión es igual a la velocidad a la que los neutrones se pierden por absorción y fuga. Producir demasiados neutrones significaría que las reacciones fuera de control, mientras que producir muy pocos provocaría que las reacciones desaparecieran. La criticidad requiere un equilibrio cuidadoso de la masa del combustible, la densidad del combustible, la temperatura y otras variables.

El reactor nuclear de Fermi entró en funcionamiento en 1942. El Chicago Pile-1 se construyó en una cancha de squash de una universidad, utilizando casi 5 toneladas de uranio no enriquecido, 44 toneladas de óxido de uranio y 363 toneladas de ladrillos de grafito. Era tosco, sin blindaje y de baja potencia, pero marcó la primera vez que los científicos sufrieron una reacción en cadena de fisión.

Mientras que los reactores nucleares deben mantener la criticidad para uso civil (como en las centrales nucleares), las armas nucleares deben superar la criticidad para liberar cantidades mortales de energía vinculante en un instante. Los científicos que trabajaban con Oppenheimer en Los Alamos fueron responsables del diseño de tales armas. Un diseño utilizó la implosión, en la que los explosivos alrededor de un núcleo fisionable se encendieron y produjeron ondas de choque. Él comprimió el núcleo a un volumen más pequeño y denso que superó la criticidad. Un diseño alternativo, un arma “tipo pistola”, destruyó dos



Uranio-235(U-235) es un isótopo purificado de uranio. Este isótopo es naturalmente inestable y emite neutrones y calor. La fisión nuclear del U-235 comienza cuando un neutrón choca contra un núcleo de U-235. El núcleo se divide para producir núcleos “hijos” más pequeños y livianos, además de algunos neutrones más, cada uno de los cuales puede producir fisión en más núcleos de uranio.



La primera bomba atómica del mundo. (cuyo nombre clave es Trinity) fue detonado en un sitio de pruebas en Alamogordo, Nuevo México, el 16 de julio de 1945, produciendo una enorme bola de fuego y una nube de escombros en forma de hongo.

Pedazos más pequeños de material fisible se juntaban a alta velocidad para crear una gran masa que excedía la criticidad.

En julio de 1945, en el desierto de Nuevo México, los científicos del Proyecto Manhattan detonaron por primera vez un arma nuclear. Una enorme bola de fuego fue seguida por una nube radiactiva de escombros y vapor de agua. La mayoría de los observadores guardaron silencio. Oppenheimer admitió más tarde que me vinieron a la mente las palabras del dios Vishnu de las escrituras hindúes: “Ahora me he convertido en la Muerte, la destructora de mundos”. Las dos únicas armas nucleares jamás utilizadas en un conflicto armado hasta la fecha fueron lanzadas sobre Japón meses después: el arma tipo “Little Boy” en Hiroshima el 6 de agosto y el tipo implosión “Fat Man” (que usaba Pu-239, un isótopo de plutonio, como material fisible) en Nagasaki el 9 de agosto.

Energía nuclear para obtener energía

El fin de la guerra marcó un cambio parcial hacia la fisión nuclear con fines pacíficos, y en 1946 se creó en Estados Unidos la Comisión de Energía Atómica para supervisar la desarrollo de aplicaciones nucleares civiles. El primer reactor nuclear para generación de electricidad se inauguró en 1951 en Idaho, y las centrales nucleares civiles se multiplicaron en las dos décadas siguientes. Los reactores nucleares utilizan reacciones en cadena controladas (aceleradas o desaceleradas mediante barras de control que capturan neutrones libres) para liberar energía.

gradualmente, hirviendo agua hasta convertirla en vapor para encender generadores eléctricos. La cantidad de energía que se puede extraer del combustible nuclear es millones de veces mayor que la que se encuentra en cantidades similares de combustibles como el carbón, lo que lo convierte en una fuente de energía eficiente y neutra en carbono.

Sin embargo, en 1986, las explosiones en el núcleo de un reactor de Chernobyl, en Ucrania, entonces parte de la Unión Soviética, liberaron material radiactivo a la atmósfera y acabaron matando a miles de personas en toda Europa. Este y otros desastres nucleares, junto con las preocupaciones sobre cómo almacenar desechos altamente radiactivos y de larga duración, han socavado el potencial de la energía nuclear.
credenciales medioambientales.

¿De la fisión a la fusión?

Algunos físicos esperan que la fusión nuclear pueda ser la fuente de energía sostenible del futuro. Se trata de la unión de dos núcleos para formar un núcleo más grande, liberando el exceso de energía en forma de fotones. Los científicos han luchado durante décadas para inducir la fusión: la poderosa fuerza repulsiva de los protones sólo puede superarse en medio de
calor extremo y densidad. El método más prometedor utiliza un dispositivo con forma de rosquilla llamado tokamak. Esto genera un poderoso campo magnético para retener el plasma, materia tan caliente que los electrones son despojados de sus átomos.
haciéndolo conductor y fácil de manipular con campos magnéticos.-

Enrico Fermi

Nacido en Roma en 1901, Enrico Fermi era más conocido por desarrollar las primeras aplicaciones nucleares, pero también era admirado como físico teórico. Fermi estudió en la Universidad de Pisa y luego dejó Italia para colaborar con

físicos como Max Born. Al regresar a dar clases en la Universidad de Florencia en 1924, ayudó a desarrollar la estadística de Fermi-Dirac. En 1926 se convirtió en profesor de la Universidad de Roma. Aquí propuso la teoría de la interacción débil y
Fisión nuclear demostrada.

En 1938, el año en que Fermi ganó el Premio Nobel de Física, huyó de la Italia fascista para escapar de las leyes antijudías que restringían los derechos de su esposa y sus colegas. A pesar de su estrecha implicación con el Proyecto Manhattan, más tarde se convirtió en un crítico vocal del mismo.

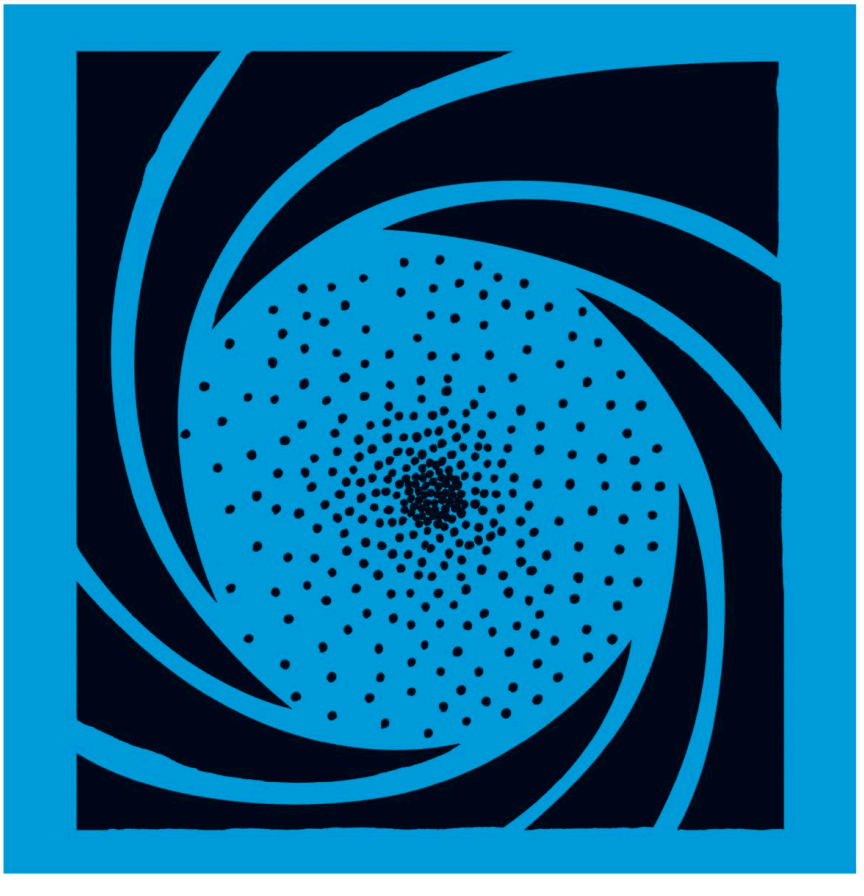
desarrollo de armas nucleares. Murió en Chicago en 1954.

Trabajos clave

1934“Radiactividad artificial producida por neutrones Bombardeo"
1938“Captura simple de neutrones por uranio”

UNA VENTANA SOBRE LA CREACIÓN

ACELERADORES DE PARTÍCULAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE

John Cockroft(1897-1967)

ANTES

1919 Ernesto Rutherford induce artificialmente la fisión nuclear (división del núcleo de un átomo en dos núcleos).

1929 El físico ucraniano-estadounidense George Gamow expone su teoría del túnel cuántico para las partículas alfa emitidas en la desintegración alfa.

DESPUÉS

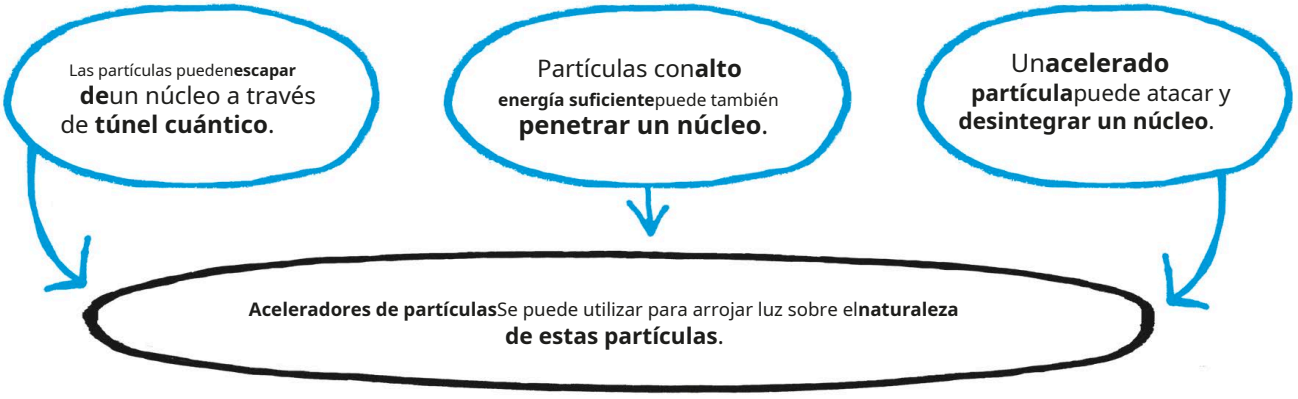
1952 El Cosmotron, el primer sincrotrón de protones, comienza a funcionar en el Laboratorio Nacional Brookhaven de Estados Unidos.

2009 El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN en Suiza entra en pleno funcionamiento y bate el récord como acelerador de partículas de mayor energía.

En 1919, la investigación de Ernest Rutherford sobre el La desintegración de los átomos de nitrógeno demostró que es posible romper partículas unidas por la fuerza nuclear, una de las fuerzas más fuertes del universo. Pronto, los físicos se preguntaron si podrían explorar más profundamente el interior del átomo rompiéndolo en pedazos y examinando los restos.

A finales de la década de 1920, el ex soldado e ingeniero británico John Cockcroft fue uno de los jóvenes físicos que ayudaron a Rutherford en tales tareas. investigación en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge. Cockcroft estaba intrigado por el trabajo de George Gamow, quien en 1928

Ver también: Modelos de materia 68–71 · Aplicaciones cuánticas 226–231 Partículas subatómicas 242–243 · El zoológico de partículas y quarks 256–257 · El bosón de Higgs 262-263 Masa y energía 284–285 · El Big Bang 296–301



describió el fenómeno del túnel cuántico. Ésta es la idea de que las partículas subatómicas, como las partículas alfa, pueden escapar del núcleo, a pesar de la fuerte fuerza nuclear que las restringe, porque tienen forma de onda.

atributos, lo que permite a algunos ir más allá de la barrera de la fuerza nuclear, escapando de su poder de atracción.

Revertir el principio

Gamow visitó el laboratorio de Cambridge por invitación de Cockcroft y los hombres discutieron si la teoría de Gamow podría aplicarse a la inversa; ¿Era posible acelerar un protón con energía suficiente para penetrar y reventar el núcleo de un elemento? Cockcroft le dijo a Rutherford que creía que podían penetrar un núcleo de boro utilizando protones acelerados con 300 kilovoltios, y que un núcleo de litio requeriría potencialmente menos energía. El boro y el litio tienen núcleos ligeros, por lo que las barreras energéticas a superar son menores que las de los elementos más pesados.

Rutherford dio el visto bueno y, en 1930, acompañado por el físico irlandés Ernest Walton, Cockcroft experimentó con la aceleración.

haces de protones de un tubo de rayos de canal (esencialmente un tubo de rayos catódicos de atrás hacia adelante). Cuando no pudieron detectar los rayos gamma observados por los científicos franceses que realizaban investigaciones similares, se dieron cuenta de que la energía de sus protones era demasiado baja.

Energía cada vez mayor

Comenzó la búsqueda de aceleradores de partículas más potentes. En 1932, Cockcroft y Walton construyeron un nuevo aparato que podía acelerar un haz de protones a energías más altas utilizando voltajes más bajos. Este acelerador Cockcroft-Walton comienza acelerando partículas cargadas a través de un diodo inicial (un dispositivo semiconductor) para cargar un condensador (un componente que almacena energía eléctrica) hasta el voltaje máximo. El voltaje es entonces

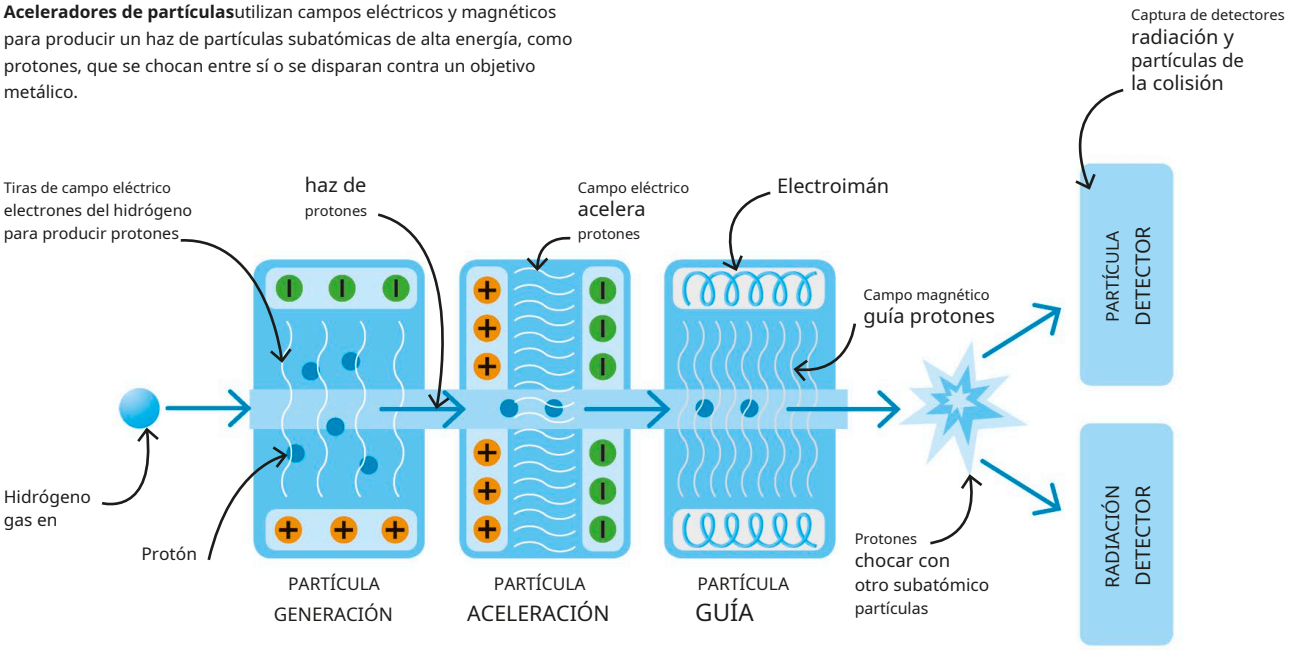
invertido, impulsando las partículas a través del siguiente diodo y duplicando efectivamente su energía. A través de una serie de condensadores y diodos, la carga se acumula varias veces más de lo que normalmente sería posible, aplicando la

tensión máxima.

Utilizando este dispositivo pionero, Cockcroft y Walton bombardearon núcleos de litio y berilio con protones de alta velocidad y monitorearon las interacciones en un detector, una pantalla fluorescente de fluoruro de zinc. Esperaban ver los rayos gamma que habían informado los científicos franceses Irene Joliot-Curie y su marido Frédéric. En cambio, sin darse cuenta produjeron neutrones (como lo demostraría más tarde el físico británico James Chadwick). Cockcroft y Walton realizaron entonces la primera desintegración artificial de un núcleo atómico en un núcleo de litio, reduciéndolo a partículas alfa.

> Del litio salían partículas que golpeaban la pantalla. y produciendo centelleos. Parecían estrellas apareciendo de repente y desapareciendo.
>
> **Ernesto Walton**
>
> **sobre la división del átomo**

Aceleradores de partículasutilizan campos eléctricos y magnéticos para producir un haz de partículas subatómicas de alta energía, como protones, que se chocan entre sí o se disparan contra un objetivo metálico.



Con esta primicia histórica, Cockcroft y Walton demostraron el valor de utilizar aceleradores de partículas (apodados "destructores de átomos") para sondear el átomo y descubrir nuevas partículas, ofreciendo una alternativa más controlada a la observación de rayos cósmicos (partículas de alta energía que se mueven en el espacio).

Aceleradores de alta potencia

Las máquinas Cockcroft-Walton y todos los primeros aceleradores de partículas eran dispositivos electrostáticos que utilizaban un campo eléctrico estático para acelerar las partículas. Estos todavía se utilizan ampliamente hoy en día en estudios académicos, médicos e industriales de partículas de baja energía, y en aplicaciones electrónicas cotidianas, como los hornos microondas. Sin embargo, su límite energético impide su uso para la investigación en la física de partículas moderna. En un cierto punto de energía, aumentar los voltajes para empujar más las partículas hace que los aisladores utilizados en la construcción de los aceleradores de partículas experimenten una falla eléctrica y comiencen a conducir.

La mayoría de los aceleradores en la investigación de la física de partículas utilizan campos electromagnéticos oscilantes para acelerar partículas cargadas. En los aceleradores electrodinámicos, una partícula se acelera hacia una placa y, a medida que la atraviesa, la carga de la placa cambia, repeliendo la partícula hacia la siguiente placa. Este

El proceso se repite con oscilaciones cada vez más rápidas para empujar las partículas a velocidades comparables a la de la luz. Estos campos oscilantes generalmente se producen mediante uno de dos mecanismos: inducción magnética u ondas de radiofrecuencia (RF). La inducción magnética utiliza un campo magnético para inducir el movimiento de partículas cargadas y crear un campo eléctrico circulante. Una cavidad de RF es una cámara metálica hueca en la que las ondas de radio resonantes crean un campo electromagnético para impulsar las partículas cargadas a medida que pasan.

Los aceleradores de partículas modernos son de tres tipos: aceleradores lineales (linacs), ciclotrones, y sincrotrones. Los Linacs, como el Acelerador Lineal de Stanford en California, aceleran partículas en línea recta hacia un objetivo en un extremo. Los ciclotrones son compuesto por dos placas huecas en forma de D y un imán, que dobla las partículas en una trayectoria circular a medida que giran en espiral hacia un objetivo. Los sincrotrones aceleran partículas cargadas continuamente en un círculo, hasta que alcanzan las energías requeridas, utilizando muchos imanes para guiar las partículas.

Velocidades vertiginosas de las partículas

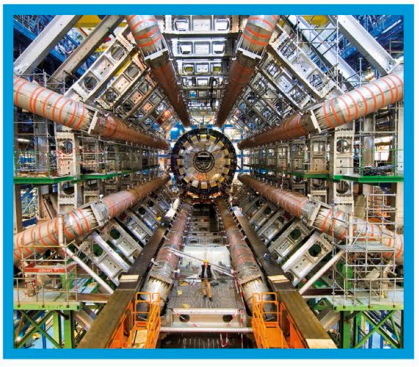
En 1930, Cockcroft y Walton descubrieron que cuanto más podían acelerar las partículas, más profundamente podían ver la materia. Los físicos ahora pueden utilizar aceleradores de sincrotrón que impulsan las partículas a velocidades vertiginosas, que las acercan a la velocidad de la luz. Estas velocidades crean efectos relativistas; como energía cinética de una partícula

aumenta, su masa aumenta, requiriendo fuerzas mayores para lograrlo.

mayor aceleración. Las máquinas más grandes y potentes que existen son el foco de atención experimentos que pueden involucrar a miles de científicos de todo el mundo. Tevatron de Fermilab en Illinois, que operaba desde 1983 a 2011, utilizó un anillo de 3,9 millas (6,3 km) de largo para acelerar protones y antiprotones a energías de hasta 1 TeV (10^{12}- 1eV), donde 1 eV es la energía ganada por un electrón acelerado a lo largo de un voltio; 1 TeV es aproximadamente la energía del movimiento de un mosquito volador.

A fines de la década de 1980, en el CERN en Suiza, los científicos armados con el Super Sincrotrón de Protones compitieron con los científicos del Fermilab que usaban el Tevatron en la búsqueda del quark superior (el quark más pesado). Gracias al gran poder del Tevatron, los científicos del Fermilab pudieron producir y detectar el quark top en 1995, con una masa de aproximadamente 176 GeV/C^2 (casi tan pesado como un átomo de oro).

El Tevatron fue derribado de su pedestal como el acelerador de partículas más potente en 2009 con la primera ejecución en pleno funcionamiento del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. El LHC es un sincrotrón,



El sistema de calorimetría ATLASen el CERN, visto aquí durante la instalación, mide la energía de las partículas después de una colisión obligándolas a detenerse y depositar su energía en el detector.

Tiene 27 kilómetros (16,8 millas) de largo, cruza la frontera de Suiza y Francia a 100 m (328 pies) bajo tierra y es capaz de acelerar dos haces de protones al 99,9999991 por ciento de la velocidad de la luz.

El LHC es un triunfo de la ingeniería; sus tecnologías innovadoras, implementadas a enorme escala, incluyen 10.000 imanes superconductores, enfriados a temperaturas inferiores a las que se encuentran en las tierras salvajes del espacio. Durante el funcionamiento, el sitio consume aproximadamente un tercio de la energía total. consumo de la cercana ciudad de Ginebra. Una cadena de aceleradores de refuerzo (incluido el Super Sincrotrón de Protones) acelera haces de partículas cargadas a energías cada vez mayores hasta que finalmente ingresan al LHC. Aquí las partículas chocan frontalmente en cuatro puntos de colisión, con energías combinadas de 13 TeV. Un grupo de detectores registra sus desintegraciones.

Recreando un estado primitivo

Entre los experimentos realizados en el LHC se encuentran intentos de recrear las condiciones que existían en la génesis misma del universo. A partir de lo que se sabe sobre su expansión, los físicos pueden retroceder y predecir que el universo primitivo era inimaginablemente pequeño, caliente y denso.

En estas condiciones, las partículas elementales como los quarks y los gluones pueden haber existido en una especie de "sopa" (plasma de quarks y gluones). A medida que el espacio se expandió y enfrió, se unieron estrechamente, formando partículas compuestas como protones y neutrones. Aplastar partículas a una velocidad cercana a la de la luz puede reinventar por un instante el universo tal como era una billonésima de segundo después del Big Bang.

John Cockroft

Nacido en Yorkshire, Inglaterra, en 1897, John Cockcroft sirvió en la Primera Guerra Mundial y luego estudió ingeniería eléctrica. Ganó una beca para la Universidad de Cambridge en 1921, donde Ernest Rutherford luego supervisó su doctorado. El acelerador Cockcroft-Walton que construyó en Cambridge con Ernest Walton les valió el Premio Nobel de Física de 1951.

En 1947, como director del Establecimiento Británico de Investigación de Energía Atómica, Cockcroft supervisó la inauguración del primer reactor nuclear en Europa occidental: GLEEP en Harwell. En 1950, La insistencia de Cockcroft en que se instalaran filtros en las chimeneas de Windscale Piles en Cumbria limitó las consecuencias en 1957, cuando uno de los reactores se incendió.

Cockcroft se desempeñó como presidente del Instituto de Física y de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia. Murió en Cambridge en 1967.

Trabajos clave

1932*Desintegración del litio por protones rápidos*
1932–36"Experimentos con iones positivos de alta velocidad I-VI"

LA CAZA PARA EL CUARK

EL ZOO DE PARTÍCULAS Y LOS CUARKS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Murray Gell-Mann
(1929-2019)

ANTES

1947 El kaón subatómico se descubre en la Universidad de Manchester y muestra una vida útil mucho más larga de lo previsto.

1953 Los físicos proponen la propiedad de "extrañeza" para explicar el comportamiento inusual de los kaones y otras partículas.

1961 Gell-Mann propone la "Óctuple Vía" para organizar las partículas subatómicas.

DESPUÉS

1968 Los experimentos de dispersión revelan objetos puntiformes dentro del protón, lo que demuestra que no es una partícula fundamental.

1974 Los experimentos producen j/-partículas que contienen quarks charm.

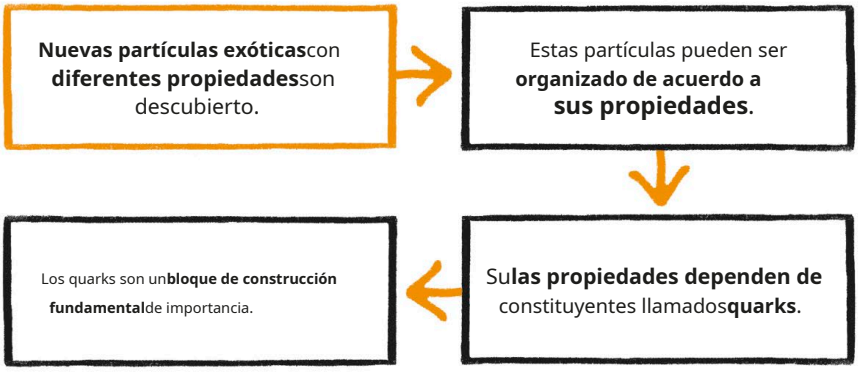
1995 Se completa el descubrimiento del quark top el modelo de quarks.

Al final de la Segunda Guerra Mundial, los físicos habían descubierto el protón, el neutrón y el electrón, y un puñado de otras partículas. Sin embargo, en los años siguientes, los descubrimientos en rayos cósmicos (partículas de alta energía que se mueven a través del espacio) y aceleradores de partículas hicieron que el número de partículas se disparara hasta convertirse en un caótico "zoológico de partículas".

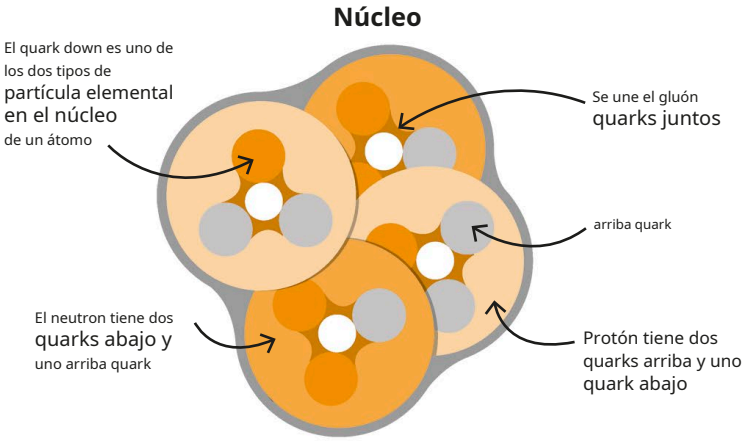
Los físicos estaban particularmente confundidos por las familias de partículas llamadas kaones y bariones lambda, que se desintegran mucho más lentamente de lo esperado. En 1953, el físico estadounidense Murray Gell-Mann y los físicos japoneses Kazuhiko Nishijima y Tadao Nakano propusieron de forma independiente que Una cualidad fundamental llamada "extrañeza" podría explicar estas vidas observadas durante mucho tiempo. La extrañeza se conserva en las interacciones fuertes y electromagnéticas, pero no en las interacciones débiles, por lo que las partículas con extrañeza solo pueden descomponerse a través de la interacción débil. Gell-Mann utilizó la extrañeza y la carga para clasificar las partículas subatómicas en familias de mesones (normalmente más ligeros) y bariones (normalmente más pesados).

teoría de los quarks

En 1964, Gell-Mann propuso el concepto de quark, una partícula fundamental que podría explicar las propiedades de los nuevos mesones y bariones. Según la teoría de los quarks, los quarks vienen en seis



Ver también: Modelos de materia 68–71 · Partículas subatómicas 242–243 Antimateria 246 · La fuerza fuerte 247 Portadores de fuerza 258–259 · El bosón de Higgs 262-263



Protones y neutrones cada uno contiene quarks arriba y abajo. Un protón tiene dos quarks arriba y un quark abajo, y un neutrón tiene un quark arriba y dos quarks abajo. Los quarks están unidos entre sí por gluones, las partículas portadoras de la fuerza fuerte.

"sabores" con diferentes propiedades intrínsecas. Gell-Mann describió inicialmente los quarks arriba, abajo y extraños, y más tarde se agregaron quarks encanto, superior e inferior. Los diferentes quarks (y sus equivalentes de antimateria, los antiquarks) están unidos por la fuerza fuerte y se encuentran en partículas compuestas como protones y neutrones. Se encontraron pruebas de este modelo del núcleo en el Laboratorio del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) en California, cuando se encontraron objetos puntiformes.
descubierto dentro de los protones en 1968. Otros experimentos SLAC produjeron evidencia de los otros quarks.

El modelo estándar

Los quarks desempeñan un papel importante en el modelo estándar de física de partículas, que se desarrolló en la década de 1970 para explicar las fuerzas electromagnéticas, fuertes y débiles, así como sus partículas portadoras (que siempre son bosones) y las fuerzas fundamentales.
partículas de materia (fermiones). Los quarks son uno de los dos grupos de fermiones, el otro son los leptones. Al igual que los quarks, los leptones vienen en seis tipos, que están relacionados en pares o "generaciones". Estos son el electrón y el neutrino electrónico, que son los leptones más ligeros y estables; el muón y el neutrino muónico; y el tau y el neutrino tau, que son los leptones más pesados e inestables. A diferencia de los quarks, los leptones no se ven afectados por la fuerza fuerte.

Los quarks y los leptones interactúan a través de tres de las cuatro fuerzas fundamentales: fuerte, electromagnética y débil. (La cuarta fuerza fundamental, la gravedad, se comporta de manera diferente). En el modelo estándar, estas fuerzas están representadas por sus partículas portadoras: gluones, fotones y bosones W y Z.

El último elemento del modelo estándar es el bosón de Higgs, una partícula elemental que da masa a todas las partículas. El Modelo Estándar ha puesto orden en el "zoológico de partículas", aunque sigue siendo un trabajo en progreso.

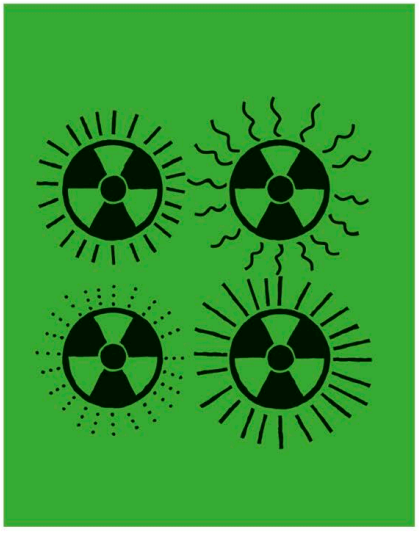
Murray Gell-Mann

Nacido en Nueva York en 1929 en una familia de inmigrantes judíos, Murray Gell-Mann comenzó asistió a la universidad con sólo 15 años. En 1955, se trasladó al Instituto de Tecnología de California (CIT), donde enseñó durante casi 40 años. Sus intereses se expandieron mucho más allá de la física para incluir la literatura, la historia y la historia natural, pero en 1969 recibió el Premio Nobel de Física por su trabajo sobre la teoría de las partículas elementales.

Más adelante en su carrera, Gell-Mann se interesó en la teoría de la complejidad, cofundó el Instituto Santa Fe para la investigación en esta área en 1984 y escribió un libro popular sobre la teoría (*El quark y el jaguar*). En el momento de su muerte en 2019, ocupaba cargos en CIT, la Universidad del Sur de California y la Universidad de Nuevo México.

Trabajos clave

1994 *El quark y el jaguar: aventuras en lo simple y lo complejo* **2012** *María McFadden: Una Una vida de diseño, coleccionismo y aventuras*



NUCLEAR IDÉNTICO
LAS PARTÍCULAS NO
ACTÚA SIEMPRE IGUAL

PORTADORES DE FUERZA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Chien-Shiung Wu
(1912-1997)

ANTES

1930 El físico austriaco Wolfgang Pauli propone la existencia de un neutrino para explicar cómo se puede conservar la energía y otras cantidades en la desintegración beta.

1933 Enrico Fermi expone su teoría de la interacción débil para explicar la desintegración beta.

DESPUÉS

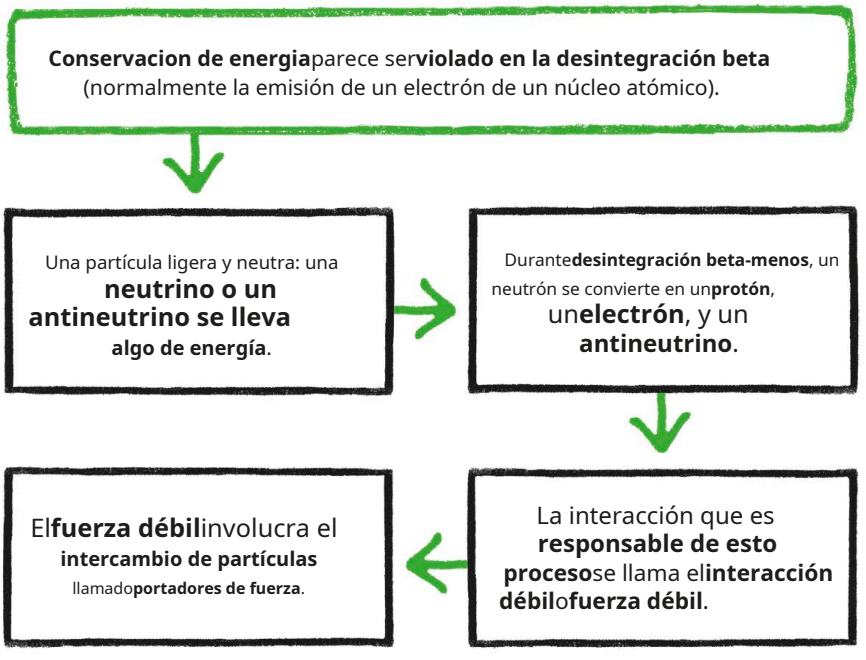
1956 Los físicos estadounidenses Clyde Cowan y Frederick Reines confirman que durante la desintegración beta se emiten tanto electrones como neutrinos.

1968 Las fuerzas electromagnéticas y débiles están unificadas en la "teoría electrodébil".

1983 Los bosones W y Z se descubren en el Super Proton Synchrotron, un acelerador de partículas del CERN.

Alrededor de 1930, los científicos comenzaron a desentrañar el proceso de desintegración nuclear. La desintegración beta había desconcertado a los investigadores anteriores, ya que la energía parecía desaparecer, en violación de la ley de conservación de la energía. Durante las siguientes cinco décadas, destacados físicos descubrirían a los portadores de la energía faltante, detallarían los cambios que transformaron los elementos dentro de núcleos atómicos inestables, e identificar y observar los portadores de fuerza que median (transmiten) los débiles interacción en la desintegración nuclear.

En 1933, Enrico Fermi propuso que la radiación beta emerge del núcleo cuando un neutrón se convierte en un protón, emitiendo un electrón y otra partícula neutra que se lleva algo de energía. (Fermi llamó a esta partícula neutra



Ver también: Teoría cuántica de campos 224-225 · Rayos nucleares 238–239 · Antimateria 246 · El zoológico de partículas y los quarks 256-257 · Neutrinos masivos 261 · El bosón de Higgs 262-263

neutrino, pero más tarde fue identificado como un antineutrino, la antipartícula del neutrino). En el otro tipo principal de desintegración beta (la desintegración beta plus), un protón se convierte en un neutrón, emitiendo un positrón y un neutrino. La fuerza responsable de tales desintegraciones se denominó interacción débil, actualmente reconocida como una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.

La fuerza que rompe las reglas

Las interacciones fuertes y electromagnéticas conservan la paridad; su efecto sobre un sistema es simétrico y produce una especie de imagen especular. Sospechando que esto no era cierto para la interacción débil, los físicos Chen Ning Yang y Tsung-Dao Lee pidieron a Chien-Shiung Wu que investigara. En 1956, el mismo año en que Clyde Cowan y Frederick Reines confirmaron la existencia de neutrinos, Wu se puso a trabajar en el laboratorio de baja temperatura de la Oficina Nacional de Estándares de Estados Unidos en Washington, DC. Alineó los espines (momento angular interno) de los núcleos en una muestra de cobalto-60, y observó cómo decaído. Vio que los electrones emitidos durante la radiación beta tenían preferencia por una dirección específica de desintegración (en lugar de ser emitidos aleatoriamente en todas las direcciones por igual), lo que demuestra que la interacción débil viola la conservación de la paridad.

La interacción débil implica el intercambio de partículas portadoras de fuerza: W^+, W^- y Z^0 bosones. Todas las partículas portadoras de fuerza son bosones (espín entero), mientras que los componentes clave de la materia, como los quarks y los leptones, son todos fermiones (espín medio entero) y obedecen a principios diferentes. Excepcionalmente, la interacción débil también puede cambiar el "sabor" o las propiedades de los quarks. Durante la desintegración beta-menos, un quark "abajo" se transforma en un quark "arriba", transformando un neutrón en un protón, y emite un W virtual. bosón, que se desintegra en un electrón y un antineutrino. La W

Gargamelle, visto aquí en 1970 fue diseñado para detectar neutrinos y antineutrinos. A través de sus ventanillas, las cámaras podrían rastrear el rastro de partículas cargadas.

Los bosones Z y Z son muy pesados, por lo que los procesos que ocurren a través de ellos tienden a ser muy lentos.

En 1973, se observaron las interacciones de los bosones en la cámara de burbujas Gargamelle del CERN, que capturó huellas que proporcionaron la primera confirmación de la interacción débil de la corriente neutra. Esto se interpretó como un neutrino que estaba perdiendo impulso después de ser producido en el intercambio de un bosón Z. Los propios bosones W y Z se observaron por primera vez en 1983 utilizando el Súper Sincrotrón de Protones (SPS) de alta energía en el CERN.

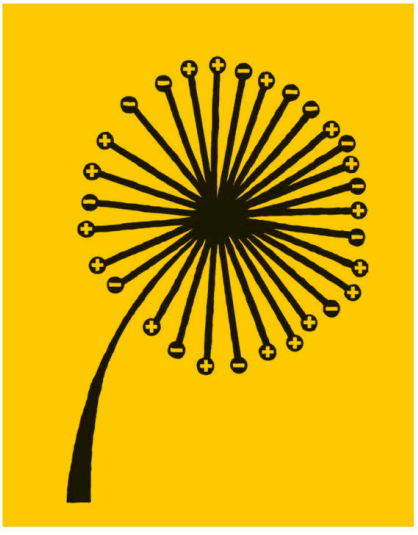
Chien-Shiung Wu

Nacido en 1912, en Liuhe, cerca de Shanghai en China, Chien-Shiung Wu desarrolló una pasión por la física después de leer una biografía de la física y química polaca Marie Curie. Estudió física en la Universidad Nacional Central de Nanjing y luego se mudó a los Estados Unidos en 1936, donde obtuvo su doctorado en la Universidad de California-Berkeley.

Wu se unió al Proyecto Manhattan en 1944 para trabajar en el enriquecimiento de uranio. Después de la Segunda Guerra Mundial, se convirtió en profesora en la Universidad de Columbia y se centró en la desintegración beta. Los colaboradores de Wu, Tsung-Dao Lee y Chen Ning. Yang recibió el Premio Nobel de Física en 1957 por descubrir la violación de la paridad; su contribución no fue reconocida. Finalmente fue honrada en 1978, cuando recibió el Premio Wolf por sus logros científicos. Wu murió en Nueva York en 1997.

Trabajos clave

1950 "Investigación reciente de las formas de los espectros de rayos beta" **1957** "Prueba experimental de conservación de la paridad en desintegración beta" **1960** *desintegración beta*



LA NATURALEZA ES ABSURDO

ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Shin'ichirō Tomonaga (1906-1979), **Julian Schwinger** (1918-1994)

ANTES
1865 James Clerk Maxwell expone la teoría electromagnética de la luz.

1905 Albert Einstein publica un artículo que describe la relatividad especial.

1927 Paul Dirac formula una teoría de la mecánica cuántica de los objetos cargados y el campo electromagnético.

DESPUÉS
1965 Tomonaga, Schwinger y Richard Feynman comparten el Premio Nobel de Física por su trabajo sobre la cuántica electrodinámica.

1973 Se desarrolla la teoría de la cromodinámica cuántica, con la carga de color como fuente de la interacción fuerte (fuerza nuclear fuerte).

El surgimiento de la mecánica cuántica, que describe el comportamiento de los objetos a escalas atómica y subatómica, obligó a una transformación de muchas ramas de la física.

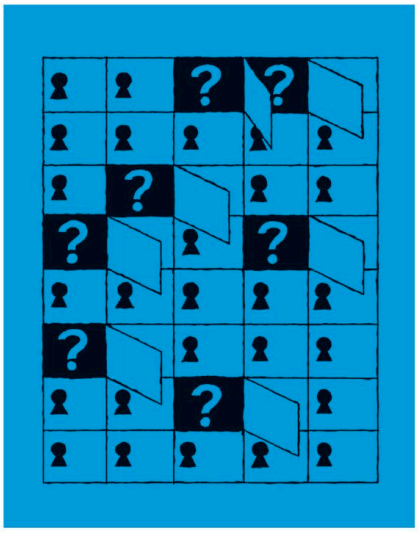
Paul Dirac propuso una teoría cuántica del electromagnetismo en 1927, pero los modelos que describen encuentros entre campos electromagnéticos y partículas de alta velocidad (que obedecen las leyes de la relatividad especial) fracasaron. Esto llevó a suponer que la mecánica cuántica y la relatividad especial no eran compatible. En la década de 1940, Shin'ichirō Tomonaga, Richard Feynman y Julian Schwinger demostraron que la electrodinámica cuántica (QED) podía hacerse coherente con la relatividad especial. De hecho, QED fue la primera teoría que combinó la mecánica cuántica y la relatividad especial.

En la electrodinámica clásica, las partículas cargadas eléctricamente ejercen fuerzas a través de los campos que producen. En QED, sin embargo, las fuerzas entre partículas cargadas surgen del intercambio de fotones virtuales o mensajeros: partículas que surgen momentáneamente y afectan el movimiento de las partículas "reales" a medida que se liberan o absorben.

La QED se ha utilizado para modelar fenómenos que anteriormente desafiaban toda explicación. Un ejemplo es el desplazamiento de Lamb: la diferencia de energía entre dos niveles de energía de un átomo de hidrógeno.

Siguiendo sus contribuciones Según QED, Shin'ichiro Tomonaga recibió el Premio Nobel de Física, el Premio de la Academia Japonesa y muchos otros premios.

Ver también: Campos de fuerza y ecuaciones de Maxwell 142–147 · Partículas y ondas 212–215 · Teoría cuántica de campos 224-225 El zoológico de partículas y los quarks 256-257



EL MISTERIO
DE LOS DESAPARECIDOS
NEUTRINOS

NEUTRINOS MASIVOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Masatoshi Koshiba(1926–)

ANTES

1956 Los físicos estadounidenses Clyde Cowan y Frederick Reines publican los resultados de su experimento confirmando la existencia de neutrinos.

1970"Los experimentos Homestake" comienzan en los EE. UU. y detectan solo un tercio de los resultados previstos. número de neutrinos solares.

1987 Investigadores en Japón, Estados Unidos y Rusia detectan un lote récord de 25 neutrinos, originados en una supernova en la Gran Nube de Magallanes.

DESPUÉS

2001 Los científicos del Observatorio de Neutrinos de Sudbury, Canadá, encuentran más evidencia de oscilación de neutrinos.

2013 Los resultados del experimento T2K confirman la Teoría de la oscilación de neutrinos.

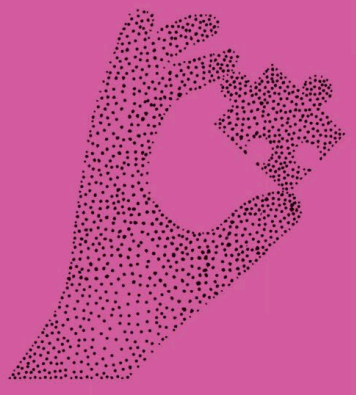
Desde la década de 1920, los físicos saben que la fusión nuclear hace que el Sol y otras estrellas brillen. Continuaron prediciendo que este proceso libera partículas llamadas neutrinos, que caen sobre la Tierra desde el espacio.

Los neutrinos han sido comparados con fantasmas debido al desafío que supone detectarlos. No tienen carga, casi no tienen masa y no interactúan a través de fuertes fuerzas nucleares o electromagnéticas, lo que les permite pasar desapercibidos a través de la Tierra. Los neutrinos vienen en tres tipos o sabores: neutrinos electrónicos, muónicos y tau.

En 1985, el físico japonés Masatoshi Koshiba construyó un detector de neutrinos en una mina de zinc. Los detectores rodearon un vasto tanque de agua y captaron destellos de luz cuando los neutrinos interactuaron con los núcleos de las moléculas de agua. Koshiba confirmó que parecía haber muchos menos neutrinos solares llegando a la Tierra de lo previsto. En 1996, dirigió la construcción de un detector aún mayor (Super-Kamiokande), que permitió a su equipo resolver este problema. Las observaciones de neutrinos atmosféricos con el detector demostraron que los neutrinos pueden cambiar de sabor durante el vuelo, un proceso llamado oscilación de neutrinos. Esto significa que un neutrino electrónico creado en el Sol puede convertirse en un neutrino muón o tau y así eludir los detectores que son sensibles sólo a los neutrinos electrónicos. El descubrimiento implicó que los neutrinos tienen masa, desafiando el modelo estándar, la teoría de las fuerzas y partículas fundamentales.

> "Ahora ese neutrino
> Nace la astrofísica, ¿qué?
> ¿Deberíamos hacer lo
> siguiente? **Masatoshi Koshiba**"

Ver también: Principio de incertidumbre de Heisenberg 220–221 · Aceleradores de partículas 252–255 · El zoológico de partículas y los quarks 256-257 Portadores de fuerza 258–259



CREO LO TENEMOS

EL BOSÓN DE HIGGS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Peter Higgs(1929–)

ANTES
1959 Sheldon Glashow en Estados Unidos y Abdus Salam en Pakistán proponen que las fuerzas electromagnéticas y débiles se fusionan en un calor intenso.

1960 Japonés-americano El físico Yoichiro Nambu concibe su teoría de la ruptura de simetría, que puede aplicarse al problema de la masa de los bosones W y Z.

DESPUÉS
1983 Los bosones W y Z están confirmados en el Súper Sincrotón de Protones del CERN.

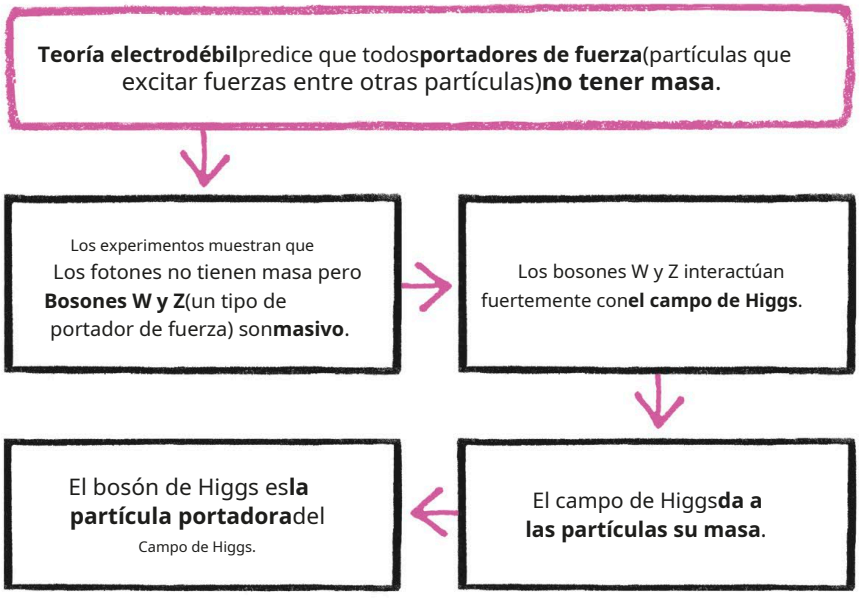
1995 Fermilab descubre el quark top con una masa de 176GeV/C^2, que coincide con las predicciones de la teoría de campos de Higgs.

2012 El CERN confirma el descubrimiento del bosón de Higgs en sus detectores ATLAS y CMS.

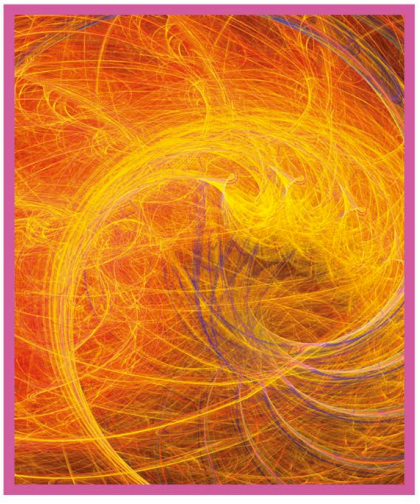
El modelo estándar, completado a principios de la década de 1970 después de décadas de investigación, explicó mucho sobre la física de partículas con un puñado de fuerzas y partículas fundamentales. Sin embargo, quedaban dudas. Mientras que dos de las fuerzas (la fuerza electromagnética y la
La interacción débil podría modelarse como una fusión en una sola fuerza electrodébil a temperaturas intensas, un aspecto de esto.

La teoría no coincidía con la realidad. Implicaba que todos los portadores de fuerzas electrodébiles no tienen masa. Si bien esto es cierto para el fotón, los bosones W y Z son notoriamente masivos.

En 1964, tres grupos de físicos: Peter Higgs en el Reino Unido; Robert Brout y François Englert en Bélgica; y Gerald Guralnik, C. Richard Hagen y Tom Kibble en Estados Unidos—habían propuesto que los bosones débiles podrían interactuar con un campo que les otorga masa; este



Ver también: Teoría cuántica de campos 224-225 · Aceleradores de partículas 252–255 · El zoológico de partículas y los quarks 256-257 · Portadores de fuerza 258–259



El campo de Higgs, imaginado en esta ilustración, es un campo de energía que se cree que existe en todo el universo; dentro de él, el bosón de Higgs interactúa continuamente con otras partículas.

pasó a ser conocido como el campo de Higgs. Según esta teoría, el campo de Higgs comenzó a extenderse por todo el universo poco después del Big Bang; cuanto más interactúa una partícula con ella, más masa adquiere. Los fotones no interactúan con el campo, lo que les permite viajar a la velocidad de la luz. Mientras tanto, los bosones W y Z interactúan fuertemente con el campo. A temperaturas normales, esto los hace pesados y lentos con alcances cortos. A medida que las partículas que interactúan con el campo de Higgs se aceleran, ganan masa y por tanto requieren más energía para impulsarlas más lejos, impidiéndoles alcanzar la velocidad de la luz.

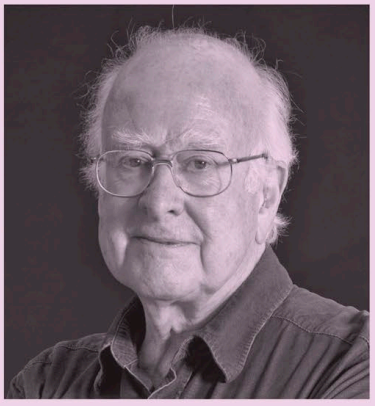
Importancia casi mítica

Los científicos se dieron cuenta de que la única manera de probar la teoría del campo de Higgs era encontrar una excitación del campo en forma de una partícula pesada, conocida como bosón de Higgs. La búsqueda adquirió una importancia casi mítica, lo que le valió al bosón el sobrenombre de "partícula de Dios" en la década de 1980, lo que no gustó a Higgs y sus colegas. Ningún detector de partículas en ese momento podía detectar y la búsqueda continuó, influyendo en el diseño del acelerador de partículas más potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, que se puso en marcha en 2008.

Mientras los físicos calculaban que sólo una de cada 10 mil millones de colisiones protón-protón en el LHC produciría un bosón de Higgs, los investigadores utilizaron los detectores del CERN para examinar los restos de cientos de billones de colisiones en busca de indicios de la partícula.

En 2012, el CERN anunció el descubrimiento de un bosón con una masa de alrededor de 126 GeV/C^2 (gigaelectrones voltios divididos por la velocidad de la luz al cuadrado): casi con certeza el bosón de Higgs. Los físicos del CERN estaban eufóricos, mientras que Higgs se conmovió hasta las lágrimas ante la validación de su teoría de 50 años. El modelo estándar ya está completo, pero los físicos continúan explorando la posibilidad de que existan otros tipos de bosones de Higgs más allá de él.

> Nunca esperé que esto sucediera en mi vida y le pediré a mi familia que pon un poco de champagne en la nevera.
>
> **Peter Higgs**



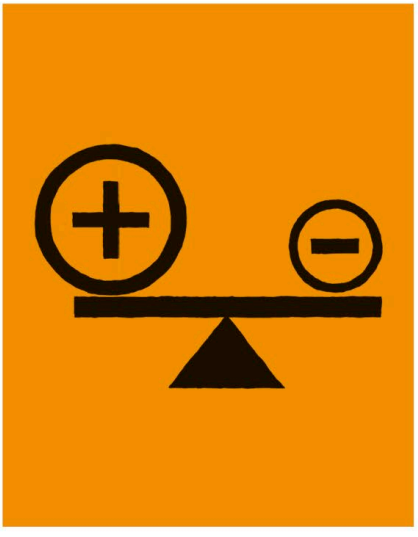
Peter Higgs

Nacido en 1929 en Newcastle upon Tyne, Higgs era hijo de un ingeniero de sonido de la BBC. Mudanzas frecuentes de casa interrumpió la educación temprana del niño, pero en la Cotham Grammar School de Bristol se inspiró en el trabajo de un antiguo alumno, el físico teórico Paul Dirac. Luego fue al King's College.
Londres y obtuvo su doctorado en 1954. Después de varios puestos académicos, Higgs decidió quedarse en la Universidad de Edimburgo. En uno de sus muchos paseos por las Tierras Altas, comenzó a formular su teoría sobre el origen de la masa, que le valió renombre, aunque reconoció fácilmente a sus muchos otros contribuyentes.

En 2013, Higgs compartió el Premio Nobel de Física con François Englert. Sigue siendo profesor emérito de la Universidad de Edimburgo.

Trabajos clave

1964 "Simetrías rotas y masas de bosones de calibre" **1966** "Ruptura espontánea de simetría sin bosones sin masa"



¿DÓNDE SE HA IDO TODA LA ANTIMATERIA?

ASIMETRÍA MATERIA-ANTIMATERIA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Andréi Sájarov(1921-1989)

ANTES
1928 Paul Dirac sugiere una nueva forma de materia con cargas opuestas: la antimateria.

1932 En Estados Unidos, Carl Anderson descubre los "antielectrones" y los llama positrones.

1951 Julián Schwinger insinúa una forma temprana de simetría CPT.

DESPUÉS
1964 Los físicos estadounidenses James Cronin y Val Fitch muestran que la desintegración débil de los mesones K neutros (kaones) viola la simetría CP.

2010 Los científicos del Fermilab detectan una preferencia por los mesones B para descomponerse en muones, violando la simetría CP.

2019 Los físicos del CERN detectan asimetría en los mesones D, la partícula más ligera que contiene quarks charm.

PAG

Los físicos llevan mucho tiempo preguntándose por qué el universo está compuesto casi exclusivamente de materia. La simetría P (paridad), la idea de que la naturaleza no puede distinguir entre izquierda y derecha, sugiere que el Big Bang debería haber producido materia y antimateria en cantidades iguales. La primera pista llegó en 1956, cuando un experimento demostró que los electrones que emanaban de la desintegración beta en una interacción débil tenían una dirección preferida. Al año siguiente, para mantener la simetría, el físico soviético Lev Landau propuso la simetría CP combinando la simetría P con la simetría C (conservación de carga), de modo que una partícula y su antipartícula con carga opuesta se comportarían como imágenes especulares.

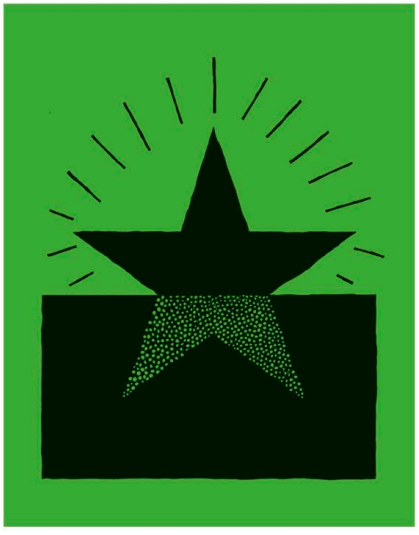
¿Universo espejo o no?

En 1964, cuando los experimentos demostraron que los mesones K neutros violan la conservación de CP cuando se desintegran, los físicos hicieron un último intento para salvar la simetría. Incorporaron simetría de inversión de tiempo, dando simetría CPT, que puede ser preservado si el espacio-tiempo se extiende hacia atrás más allá del Big Bang hacia un universo espejo de antimateria.

En 1967, el físico soviético Andrei Sajarov propuso, en cambio, que podría haber evolucionado un desequilibrio entre materia y antimateria si se hubiera producido una violación de la CP en el universo primitivo. Tiene que ser suficiente para provocar asimetría; de lo contrario, se necesitará una física más allá del modelo estándar. CP significativo
Ahora se ha demostrado una violación, lo que respalda las ideas de Sajarov.

> Los físicos comenzaron a pensar que podrían haber sido mirando la simetría incorrecta todo el tiempo.
>
> **Ulrich Nierste**
> **físico teórico alemán**

Ver también: Antimateria 246 · Portadores de fuerza 258–259 Neutrinos masivos 261 · Masa y energía 284–285 El Big Bang 296–301



LAS ESTRELLAS OBTIENEN NACIR Y MORIR

FUSIÓN NUCLEAR EN ESTRELLAS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Hans Béthe(1906-2005)

ANTES

1920 El físico británico Arthur Eddington sugiere que las estrellas obtienen su energía principalmente de la fusión hidrógeno-helio.

1931 El químico estadounidense Harold C. Urey y sus asociados detectan el deuterio, un isótopo estable del hidrógeno.

1934 El físico australiano Mark Oliphant demuestra la fusión del deuterio y descubre en el proceso el tritio, un isótopo radiactivo del hidrógeno.

DESPUÉS

1958 El primer tokamak (T-1) inicia reacciones en la Unión Soviética, pero pierde energía.
a través de la radiación.

2006 Siete miembros del ITER firman en París el acuerdo ITER, que financia un proyecto internacional a largo plazo para desarrollar la energía de fusión nuclear.

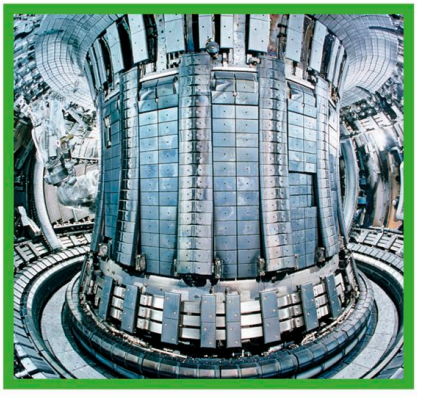
La idea de que las estrellas se alimentan infinitamente de La fusión del hidrógeno en helio entusiasmó a eminentes físicos a principios del siglo XX. A mediados de la década de 1930, habían demostrado la fusión nuclear en el laboratorio. Entre los principales teóricos se encontraba Hans Bethe, nacido en Alemania, quien se dio cuenta de que las estrellas (incluido el Sol) liberan energía a través de reacciones en cadena protón-protón.

La fusión ocurre sólo en ambientes extremos. Los núcleos cargados positivamente se repelen fuertemente entre sí pero, con suficiente energía, pueden acercarse lo suficiente para superar esta repulsión y fusionarse, formando núcleos más pesados. A medida que se fusionan, se libera energía vinculante.

Hacia una fusión controlada

En 1951, el trabajo de Bethe en Estados Unidos condujo a la prueba exitosa de la primera bomba de hidrógeno, en la que se utilizó la fisión para inducir la fusión nuclear y liberar una explosión letal de energía.

Aprovechar ese poder con reacciones de fusión controladas que liberan gradualmente energía para



El reactor tokamak JETen el Reino Unido se encuentra la instalación de fusión más grande y exitosa del mundo. Es fundamental para la investigación europea y el proyecto internacional ITER que avanza en la ciencia de la fusión.

La electricidad ha resultado más difícil debido a las inmensas temperaturas requeridas (alrededor de 40 millones de Kelvin) y al desafío de contener materiales tan calientes. El principal candidato para un reactor de fusión, el tokamak, confina el gas caliente y cargado mediante campos magnéticos.

La búsqueda continúa mientras se cree que la fusión es más segura que la fisión, con menos radiactividad y desechos nucleares.

Ver también: Generar electricidad 148–151 · La fuerza fuerte 247 Bombas nucleares y poder 248–251 Aceleradores de partículas 252–255

RELATIVI
LA UNIV

nuestro lugar en
el cosmos

TY Y

GAÉLICO

El filósofo griego Aristóteles describe un**estático y universo eterno** donde un**Tierra esférica**es rodeado de anillos concéntricos de planetas y estrellas.

SIGLO IVantes de Cristo

astrónomo persa Abd al-Rahman al-Sufi hace la primera observación registrada de**Andrómeda**, describiendo la galaxia como un "**pequeña nube**."

964

Galileo explica su principio de relatividad: el **Las leyes de la física son las mismo**si una persona es **estacionario**o**moviéndose a una velocidad constante**.

1632

Albert Einstein**teoria de relatividad especial**muestra cómo**espacio**y**cambio de tiempo**, dependiendo de la velocidad de un objeto relativa a otro.

1905

c. 150CE

Ptolomeo crea un modelo matemático del universo, mostrando **La Tierra como esfera estacionaria en el centro.**, con otros conocidos cuerpos que orbitan a su alrededor.

1543

Nicolás Copérnico proporciona un modelo para un **universo heliocéntrico**, en el que la Tierra gira alrededor del Sol.

1887

En Estados Unidos, Albert Michelson y Edward Morley prueban eso**la luz se mueve a una velocidad constante**independientemente del movimiento del observador.

A civilizaciones antiguas cuestionó lo que movimiento de estrellas a través el cielo nocturno significaba la existencia de la humanidad y su lugar dentro del universo. La aparente inmensidad de su planeta llevó a la mayoría a pensar que la Tierra debía ser el objeto más grande e importante del cosmos, y que todo lo demás giraba en torno a ella. Entre estas vistas geocéntricas, el modelo de Ptolomeo de Alejandría del siglo IICEFue tan convincente que dominó la astronomía durante siglos.

La llegada del telescopio en 1608 demostró que el astrónomo polaco Nicolás Copérnico había tenido razón al cuestionar la opinión de Ptolomeo. En Italia, Galileo Galilei observó cuatro lunas orbitando alrededor de Júpiter en 1610, lo que proporcionó pruebas de que otros cuerpos orbitaban alrededor de otros mundos.

Durante la Revolución Científica, los físicos y los astrónomos comenzaron a estudiar el movimiento de los objetos y la luz a través del espacio. Se imaginaba que el espacio era una cuadrícula rígida que abarcaba el universo, y se suponía que una longitud medida en la Tierra sería la misma en cualquier planeta, estrella (incluido el Sol) o estrella de neutrones (una pequeña estrella creada por el colapso de una estrella gigante). También se pensaba que el tiempo era absoluto, y que un segundo en la Tierra equivalía a uno en cualquier otro lugar del universo. Pero pronto quedó claro que no era así.

Una persona parada al borde de la carretera le parecerá que una pelota lanzada desde un vehículo en movimiento ha recibido un impulso de velocidad debido al movimiento del vehículo. Sin embargo, si la luz brilla desde un vehículo en movimiento, la luz no recibe un impulso en velocidad: todavía viaja a la velocidad de la luz. La naturaleza se comporta de manera extraña cerca de la velocidad de la luz para imponer un límite de velocidad universal. Establecer cómo funciona esto requirió un replanteamiento drástico tanto del espacio como del tiempo.

Relatividad especial

A principios del siglo XX, se descubrió que el espacio y el tiempo eran flexibles: un metro o un segundo tienen diferentes longitudes en diferentes lugares del universo. El físico alemán Albert Einstein presentó al mundo estas ideas en su teoría de la relatividad especial de 1905. Explicó cómo, desde la perspectiva de un observador en la Tierra, los objetos que se mueven a través del espacio a una velocidad cercana a la de la luz parecen contraerse, y cómo el tiempo parece correr más lentamente para estos objetos. Dos años después, en 1907,

1907

Hermann Minkowski explica la relatividad especial en términos de **cuatro dimensiones** del espacio y tiempo-**tiempo espacial**.

1915

Einstein publica su **teoría de la relatividad general** para describir cómo **curva de tiempo y espacio** para acelerar observadores o aquellos dentro un campo gravitacional.

1916

Karl Schwarzschild utiliza la relatividad general para predecir la existencia de **agujeros negros**, cuya gravedad es tan fuerte, **ni siquiera la luz puede escapar**.

1919

Fotografías del físico británico Arthur Eddington **la luz de las estrellas se inclinó el sol** en un eclipse solar: prueba de la curvatura del espacio-tiempo.

1929

Edwin Hubble demuestra la **el universo se está expandiendo**, señalando que las galaxias distantes se están moviendo más rápidamente que los más cercanos.

1974

En Estados Unidos, Russell Hulse y Joseph Taylor encuentran **evidencia indirecta de gravitacional ondas** cuando observan que dos estrellas pierden energía orbitando entre sí.

2017

Los científicos de LIGO anuncian el **Primera detección directa de ondas gravitacionales.** de la unión de dos estrellas de neutrones.

El matemático alemán Hermann Minkowski sugirió que la relatividad especial tiene más sentido si el tiempo y el espacio se unen en un tejido único de "espacio-tiempo".

La teoría de la relatividad especial tuvo consecuencias de gran alcance. La noción de que la energía y la masa eran simplemente dos formas de la misma cosa, como lo describe la fórmula de Einstein. $mi = mc_2$, condujo al descubrimiento de la fusión nuclear que alimenta las estrellas y, en última instancia, al desarrollo de la bomba atómica.

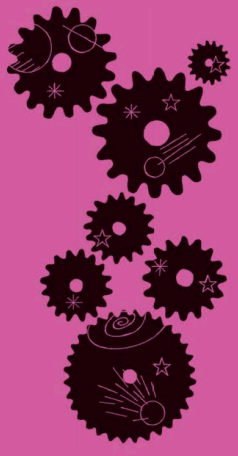
En 1915, Einstein amplió sus ideas para incluir objetos que se movían a velocidades variables y a través de campos gravitacionales. La teoría de la relatividad general describe cómo el espacio-tiempo puede doblarse, del mismo modo que una tela podría estirarse si se le coloca un peso pesado. El físico alemán Karl Schwarzschild dio un paso

Además, predijo la existencia de objetos extremadamente masivos que podrían curvar tanto el espacio-tiempo en un solo punto que nada, ni siquiera la luz, podría moverse lo suficientemente rápido como para escapar. Desde entonces, los avances en astronomía han proporcionado evidencia de estos “agujeros negros”, y ahora se cree que las estrellas más grandes se convierten en agujeros negros cuando mueren.

Más allá de la Vía Láctea

A principios de la década de 1920, los astrónomos pudieron medir con precisión la distancia a las estrellas en el cielo nocturno y la velocidad a la que se mueven en relación con la Tierra. Esto revolucionó la forma en que la gente percibía el universo y nuestro lugar dentro de él. A principios del siglo XX, los astrónomos creían que todo existía dentro de 100.000 años luz del espacio, es decir, dentro de la vía Láctea. Pero el descubrimiento de otra galaxia, la galaxia de Andrómeda, por parte del astrónomo estadounidense Edwin Hubble en 1924, llevó a la conclusión de que la Vía Láctea es sólo una de los miles de millones de galaxias que se encuentran a más de 100.000 años luz de distancia. Es más, estas galaxias se están separando, lo que lleva a los astrónomos a creer que el universo comenzó en un solo punto hace 13.800 millones de años y explotó en el llamado Big Bang.

Los astrofísicos de hoy tienen un largo camino por recorrer en su búsqueda por comprender el universo. La extraña e invisible materia oscura y energía oscura constituyen el 95 por ciento del universo conocido y parecen ejercer control sin mostrar su presencia. Asimismo, el funcionamiento de un agujero negro y el Big Bang siguen siendo un misterio. Pero los astrofísicos están cada vez más cerca.



LOS DEVANADOS DE LOS CELESTALES CUERPOS

LOS CIELOS

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Ptolomeo(C. 100–c. 170CE)

ANTES

2137antes de Cristo Los astrónomos chinos producen el primer registro conocido de un eclipse solar.

siglo IVantes de Cristo Aristóteles describe la Tierra como una esfera en el centro del universo.

C. 130antes de Cristo Hiparco compila su catálogo de estrellas.

DESPUÉS

1543 Nicolás Copérnico sugiere que el sol, no la Tierra, está en el centro del universo.

1784astrónomo francés Charles Messier crea una base de datos de otros cúmulos estelares y nebulosas de la Vía Láctea.

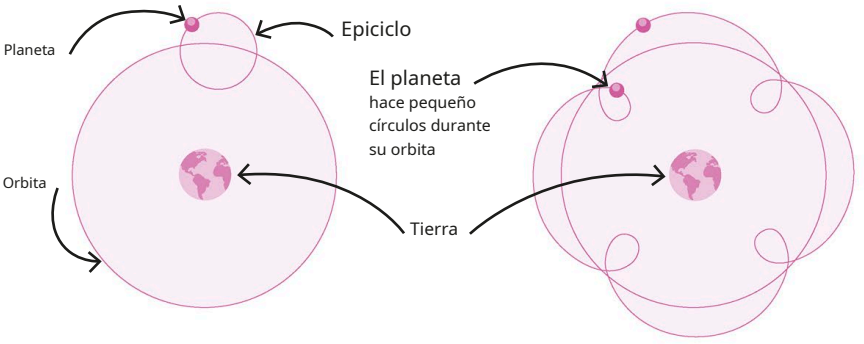
1924 El astrónomo estadounidense Edwin Hubble muestra que la Vía Láctea es una de las muchas galaxias del universo.

Desde tiempos inmemoriales, Los humanos hemos contemplado el cielo nocturno con asombro, cautivados por los movimientos del sol, la luna y las estrellas. Uno de los primeros ejemplos de astronomía primitiva es el Stonehenge de Gran Bretaña, un círculo de piedras que data aproximadamente del año 3000.antes de Cristo. Si bien el verdadero propósito de estas enormes piedras no está claro, se cree que al menos algunas fueron diseñadas para alinearse con el movimiento del sol a través del cielo, y posiblemente también con el movimiento de la luna. Existen muchos otros monumentos similares en todo el mundo.

Los primeros humanos vincularon los objetos del cielo nocturno con dioses y espíritus de la Tierra. Creían que los cuerpos celestes tenían un efecto en aspectos de sus vidas, como que la luna estaba vinculada al ciclo de fertilidad. Algunas civilizaciones, incluida la de los Incas en el siglo XV, asignaron patrones, conocidos como constelaciones, a las estrellas que aparecían regularmente en el cielo.

Stonehenge, un monumento prehistórico en Wiltshire, suroeste de Inglaterra, puede haber sido construido para que los antiguos pudieran seguir los movimientos del sol a través del cielo.

Ver también: El método científico 20-23 · El lenguaje de la física 24–31 · Modelos del universo 272–273 Descubriendo otras galaxias 290–293



Ptolomeo creíaque cada planeta orbita la Tierra y al mismo tiempo se mueve alrededor de una suborórbita o epiciclo. Pensó que esto explicaba los impredecibles movimientos "retrógrados" de las estrellas y los planetas.

mirando el cielo

No fueron sólo los movimientos de las estrellas y los planetas los que tanto intrigaron a los primeros astrónomos, sino también los acontecimientos de corta duración. Los astrónomos chinos mantuvieron registros de la aparición del cometa Halley en el cielo nocturno desde el año 1000antes de Cristo, lo que lo indica una "estrella invitada". También registraron supernovas o estrellas en explosión, en particular una que condujo a la formación de la Nebulosa del Cangrejo en 1054.CE. Los informes de la época sugieren que la supernova era lo suficientemente brillante como para ser vista durante el día durante aproximadamente un mes.

En el siglo IVantes de Cristo, el filósofo griego Aristóteles postuló que la Tierra era el centro del universo, y que todos los demás cuerpos, como la Luna y los planetas, giraban a su alrededor. En aproximadamente 150CE, Ptolomeo, un astrónomo de Alejandría, impulsó la teoría geocéntrica (centrada en la Tierra) de Aristóteles con su intento de explicar en términos matemáticos los movimientos aparentemente irregulares de estrellas y planetas en el cielo nocturno. Observar el movimiento de ida y vuelta de algunos planetas y el hecho de que otros apenas parecían moverse a la misma velocidad

En resumen, concluyó que los cuerpos celestes se movían en una serie de órbitas circulares complejas y epiciclos ("subórbitas"), con la Tierra estacionaria en el centro.

Universo centrado en la Tierra

Ptolomeo basó muchos de sus cálculos en las observaciones de Hiparco, un astrónomo griego del siglo II.antes de Cristo . En la obra más conocida de Ptolomeo, el *Almagesto*, que expone su teoría geocéntrica, utilizó las notas de Hiparco sobre los movimientos de la luna y el sol para calcular las posiciones de la luna, el sol, los planetas y las estrellas en diferentes momentos, y para predecir eclipses.

El complejo modelo del universo de Ptolomeo, conocido como sistema ptolemaico, dominó el pensamiento astronómico durante siglos. Hubo que esperar hasta el siglo XVI para que el astrónomo polaco Nicolás Copérnico sugiriera que el sol, y no la Tierra, estaba en el centro del universo. Aunque su modelo fue inicialmente ridiculizado (y el astrónomo italiano Galileo Galilei fue juzgado en 1633 por apoyarlo), finalmente se demostró que Copérnico tenía razón.

Ptolomeo

Claudio Ptolomeo, conocido como Ptolomeo, vivió alrededor del año 100CEa 170CE. Poco se sabe sobre su vida, excepto que vivió en la ciudad de Alejandría, en la provincia romana de Egipto, y escribió sobre una variedad de temas, incluyendo astronomía, astrología, música, geografía y matemáticas. En*Geografía*, enumeró las latitudes y longitudes de muchos de los lugares del mundo conocido, produciendo un mapa que podría duplicarse. Su primer trabajo importante en

la astronomía fue la*Almagesto*, en el que catalogó 1.022 estrellas y 48 constelaciones, e intentó explicar el movimiento de estrellas y planetas en el cielo nocturno. Su modelo geocéntrico del universo. persistió durante siglos. A pesar de sus imprecisiones, el trabajo de Ptolomeo tuvo una enorme influencia en la comprensión de cómo se mueven las cosas en el espacio.

Trabajos clave

C.150CE*Almagesto* **C. 150CE***Geografía*
C.150-170CE*Mesas prácticas*
C.150-170CE*Hipótesis planetarias*

LA TIERRA NO ES EL CENTRO DEL UNIVERSO

MODELOS DEL UNIVERSO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Nicolás Copérnico
(1473-1543)

ANTES

siglo sexto antes de Cristo El filósofo griego Pitágoras dice que la Tierra es redonda, basándose en que la Luna también lo es.

siglo III antes de Cristo Eratóstenes mide la circunferencia de la Tierra con gran precisión.

siglo II CE Ptolomeo de Alejandría afirma que la Tierra es el centro del universo.

DESPUÉS

1609 Juan Kepler
Describe los movimientos de los planetas alrededor del sol.

1610 Galileo Galilei observa lunas que orbitan alrededor de Júpiter.

1616 La obra de Nicolás Copérnico *De Revolutionibus Orbio celestio* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*) está prohibido por la Iglesia Católica.

El **movimientos irregulares de estrellas y planetas** no se puede explicar simplemente con la Tierra en el centro del universo.

la tierra puede **parece estar estacionario**, pero en realidad es **giratorio**, lo que explica por qué las estrellas parecen cruzar el cielo.

Visto desde la Tierra, el **otros planetas** a veces parece ser **moviéndose hacia atrás**, pero esto es una ilusión causada por el hecho de que **La Tierra misma se está moviendo**.

Copérnico creía **el sol** es estacionario cerca del **centro del universo**, y la Tierra y los otros planetas giran alrededor.

Hoy en día, la idea de que la Tierra sea plana parece cómica. Sin embargo, las primeras representaciones del mundo, incluso en el antiguo Egipto, muestran que eso era lo que creía la gente. Después de todo, la Tierra parecía extenderse en la distancia y desde su superficie no parecía curvarse. Se pensaba que la Tierra era un disco circular flotando en un océano, con una cúpula arriba: los cielos y el inframundo debajo.

No fue hasta el siglo VI. antes de Cristo que los filósofos griegos se dieron cuenta de que la Tierra era redonda. Pitágoras descubrió por primera vez que la Luna era esférica, observando que la línea entre el día y la noche en la Luna es curva. Esto le llevó a suponer que la Tierra también era esférica. Más tarde, Aristóteles añadió a esto al observar la sombra curva de la Tierra durante un eclipse lunar y las posiciones cambiantes de las constelaciones. Eratóstenes fue aún más lejos. Vio que el sol proyectaba sombras diferentes en las ciudades de Syene y Alejandría, y utilizó este conocimiento para calcular la circunferencia del planeta. Calculó que estaba entre 24.000 y 29.000 millas (38.000 y 47.000 km), no muy lejos de su valor real de 24.901 millas (40.075 km).

Ver también: El método científico 20-23 · Leyes del movimiento 40–45 · Leyes de la gravedad 46–51 · Los cielos 270–271 · Descubriendo otras galaxias 290–293 · El Big Bang 296–301

> El paso del tiempo ha revelado a todos las verdades que expuse anteriormente.
> **Galileo Galilei**

También se estudiaron mucho para determinar el lugar de la Tierra dentro del universo conocido. En el siglo IIce, Ptolomeo de Alejandría describió la Tierra como una esfera estacionaria en el centro del universo, con todos los demás cuerpos conocidos orbitando a su alrededor. Cinco siglos antes, el astrónomo griego Aristarco de Samos había sugerido que el sol era el centro del universo, pero la visión geocéntrica (centrada en la Tierra) de Ptolomeo era la más aceptada de las dos.

Júpiter ya es conocido tener 79 lunas, pero cuando Galileo Galilei observó por primera vez cuatro lunas orbitando el planeta en 1610, demostró la teoría de Copérnico de que no todo gira alrededor de la Tierra.

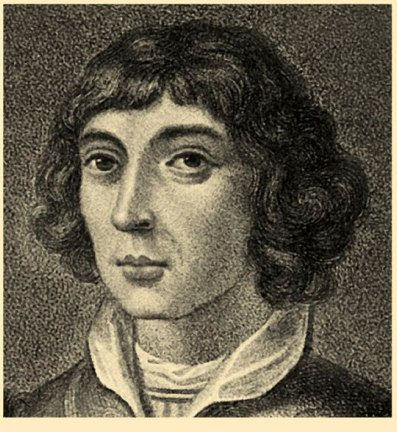
Universo centrado en el sol

La idea de un universo con el sol en el centro permaneció latente hasta principios del siglo XVI, cuando Nicolás Copérnico escribió un breve manuscrito, el *Comentariolus* y lo hizo circular entre amigos. En él, propuso un modelo heliocéntrico (centrado en el sol), con el Sol cerca del centro del universo conocido y la Tierra y otros planetas orbitando en un movimiento circular a su alrededor.
También sugirió que la razón por la que el sol salía y se ponía se debía a la rotación de la Tierra.

La Iglesia católica inicialmente aceptó el trabajo de Copérnico, pero luego lo prohibió tras las acusaciones de herejía de los protestantes. No obstante, el enfoque heliocéntrico tuvo éxito. El astrónomo alemán Johannes Kepler publicó sus leyes del movimiento en 1609 y 1619, que demostraban que los planetas se movían alrededor del

Sol en círculos no del todo perfectos, moviéndose más rápidamente cuando estaban más cerca del Sol y más lentamente cuando estaban más lejos. Cuando Galileo Galilei vio cuatro lunas orbitando Júpiter, fue una prueba de que otros cuerpos orbitaban otros mundos y que la Tierra no era el centro alrededor del cual giraba todo.

Nicolás Copérnico



Nicolás Copérnico nació el 19 de febrero de 1473 en Thorn (ahora Torun), Polonia. Su padre, un rico comerciante, murió cuando Nicolaus tenía 10 años, pero el niño recibió una buena educación gracias a su tío. Estudió en Polonia e Italia, donde desarrolló intereses en geografía y astronomía.

Copérnico continuó trabajando para su tío, que era obispo de Ermland en el norte de Polonia, pero después de la muerte del obispo en 1512, dedicó más tiempo a la astronomía. En 1514 distribuyó un folleto escrito a mano (el *Comentariolus*), en el que propuso que el sol, no la Tierra, estaba cerca del centro del universo conocido. Aunque terminó una obra más extensa titulada *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*) en 1532, no lo publicó hasta 1543, dos meses antes de morir.

Trabajos clave

1514 *Comentariolus*
1543 *Sobre las revoluciones de las esferas celestes*

NO HAY TIEMPOS VERDADEROS O LONGITUDES VERDADERAS

DE LA RELATIVIDAD CLÁSICA A LA RELATIVIDAD ESPECIAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE

Hendrik Lorentz(1853-1928)

ANTES

1632 Galileo Galilei postula que una persona en una habitación sin ventanas no puede saber si la habitación se mueve a velocidad constante o no se mueve en absoluto.

1687 Isaac Newton diseña sus leyes del movimiento utilizando partes clave de la teoría de Galileo.

DESPUÉS

1905 Albert Einstein publica su teoría de la relatividad especial, demostrando que la velocidad de la luz es siempre constante.

1915 Einstein publica su teoría de la relatividad general, explicando cómo la gravedad de los objetos curva el espacio-tiempo.

2015 Astrónomos de Estados Unidos y Europa encuentran ondas gravitacionales: ondulaciones en el espacio-tiempo predichas por Einstein un siglo antes.

Las ideas de relatividad (peculiaridades en el espacio y el tiempo) se atribuyen ampliamente a Albert Einstein a principios del siglo XX. Sin embargo, los científicos anteriores también se habían preguntado si todo lo que veían era lo que parecía.

relatividad galileana

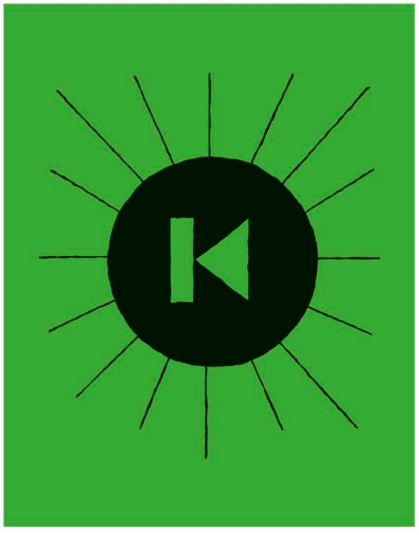
Allá por 1632, en la Italia del Renacimiento, Galileo Galilei había sugerido que era imposible saber si una habitación estaba en reposo o se movía a velocidad constante si había objetos moviéndose en su interior. Esta idea se conoce como relatividad galileana y otros intentaron ampliarla en los años siguientes. Un enfoque fue observar que las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales (aquellos que se mueven a velocidad constante).

El físico holandés Hendrik Lorentz demostró esto en 1892. Su conjunto de ecuaciones, conocidas como transformaciones de Lorentz, mostraron cómo la masa, la longitud y el tiempo cambian cuando un objeto espacial se acerca a la velocidad de la luz, y que la velocidad de la luz es constante. en un aspirador.

Galileo usó el ejemplo.de un barco que viaja a velocidad constante en un mar tranquilo. Un pasajero que dejara caer una pelota debajo de la cubierta no podría saber si el barco estaba en movimiento o estacionario.

El trabajo de Lorentz allanó el camino para la teoría de la relatividad especial de Einstein, en la que demostró que no sólo las leyes de la física son las mismas tanto si una persona se mueve a velocidad constante como si no se mueve, sino que la velocidad de la luz es la misma si se mide en cualquiera de los dos escenarios. Esta idea trajo una comprensión completamente nueva del universo.

Ver también: Leyes del movimiento 40–45 · Leyes de la gravedad 46–51 La velocidad de la luz 275 · Relatividad especial 276–279 El principio de equivalencia 281



EL SOL COMO ES ERA COMO LAS OCHO HACE MINUTOS

LA VELOCIDAD DE LA LUZ

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Alberto Michelson (1852-1931),
Eduardo Morley(1838-1923)

ANTES
siglo IV antes de Cristo Aristóteles sugiere que la luz es instantáneo.

1629 El científico holandés Isaac Beeckman intenta, sin éxito, utilizar una explosión y espejos para medir la velocidad de la luz.

1850 Los rivales franceses Hippolyte Fizeau y Léon Foucault miden cada uno la velocidad de la luz.

DESPUÉS
1905 Albert Einstein afirma que la velocidad de la luz en el vacío es siempre constante.

1920 La interferometría se utiliza para medir por primera vez el tamaño de una estrella distinta del Sol.

1983 Se define una medida oficial de la velocidad de la luz: 299.792.458m/s.

La velocidad de la luz ha molestado a la humanidad durante mucho tiempo. En la antigua Grecia, el filósofo Empédocles pensaba que la luz del sol debía tardar un tiempo en llegar a la Tierra, mientras que Aristóteles se preguntaba si tenía alguna velocidad.

Medición de la velocidad de la luz

Isaac Beeckman y Galileo Galilei hicieron los primeros intentos serios de medir la velocidad de la luz en el siglo XVII. Ambos se basaron en la vista humana y no fueron concluyentes. En 1850, Hippolyte Fizeau y Léon Foucault produjeron de forma independiente las primeras mediciones verdaderas, utilizando un engranaje giratorio y un espejo giratorio, respectivamente, para cortar o interrumpir un haz de luz. En el caso de Foucault, calculó la velocidad de la luz a partir del ángulo entre la luz que entra y sale del espejo giratorio y la velocidad de rotación del espejo.

A principios de la década de 1880, el físico estadounidense Albert Michelson mejoró la técnica de Foucault al reflejar un haz de luz en dos espejos a una distancia mayor. Construyó un interferómetro, un dispositivo que podría dividir un rayo de luz en dos, dirigir las dos partes por caminos diferentes y luego recombinarlas. Observando el patrón de la luz devuelta, calculó que la velocidad de la luz era de 299.853 km/s.

En 1887, Michelson y su compatriota estadounidense Edward Morley organizaron un experimento para medir el movimiento de la Tierra a través del "éter" a través del cual durante mucho tiempo se pensó que viajaba la luz. No encontraron evidencia de tal éter, pero registraron valores cada vez más precisos para una velocidad constante de la luz.

> La luz cree que viaja más rápido que cualquier otra cosa.
> pero está mal.
> **Terry Pratchett**
> **novelista británico**

Ver también: Luz de enfoque 170–175 · Luz grumosa y ondulada 176–179 · Difracción e interferencia 180–183 El efecto Doppler y el corrimiento al rojo 188-191

HACE OXFORD

DETENTE EN ¿ESTE TREN?

RELATIVIDAD ESPECIAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Albert Einstein(1879-1955)

ANTES
1632 Galileo Galilei plantea su relatividad hipótesis.

1687 Isaac Newton expone sus leyes del movimiento.

1861 El físico escocés James Clerk Maxwell formula sus ecuaciones que describen ondas electromagnéticas.

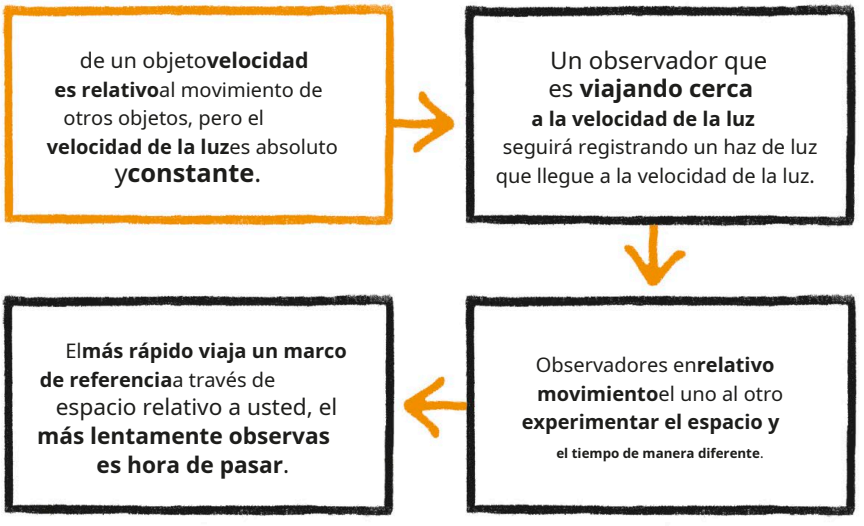
DESPUÉS
1907 Hermann Minkowski Presenta la idea del tiempo como la cuarta dimensión del espacio.

1915 Albert Einstein incluye la gravedad y la aceleración en su teoría de la relatividad general.

1971 Para demostrar la dilatación del tiempo debida a la relatividad general y especial, se hacen volar relojes atómicos alrededor del mundo.

La relatividad tiene raíces profundas. En 1632, Galileo Galilei imaginó a un viajero dentro de una cabina sin ventanas en un barco que navega a velocidad constante en un mar perfectamente tranquilo. ¿Había alguna manera de que el viajero pudiera determinar si el barco se movía sin subir a cubierta? ¿Hubo algún experimento que, si se llevara a cabo en un barco en movimiento, diera un resultado diferente al mismo experimento realizado en tierra? Galileo concluyó que no. Siempre que el barco se moviera con una velocidad constante y dirección, los resultados serían los mismos. Ninguna unidad de medida es absoluta: todas las unidades están definidas

Ver también: De la relatividad clásica a la relatividad especial 274 · La velocidad de la luz 275 Curvar el espacio-tiempo 280 · la equivalencia principio 281 · Paradojas de la relatividad especial 282–283 Masa y energía 284–285



en relación con otra cosa. Para medir cualquier cosa, ya sea tiempo, distancia o masa, tiene que haber algo con qué medirlo.

La rapidez con la que las personas perciben que un objeto se mueve depende de su velocidad en relación con ese objeto. Por ejemplo, si una persona en un tren en movimiento rápido lanza una manzana a otro pasajero, ésta viaja de uno a otro a unas pocas millas por hora, pero para un observador parado junto a las vías, la manzana y los pasajeros pasan rápidamente a una velocidad cien millas por hora.

Marcos de referencia

La idea de que el movimiento no tiene significado sin un marco de referencia es fundamental para la teoría de la relatividad especial de Albert Einstein. La teoría es especial porque se ocupa del caso especial de objetos que se mueven a una velocidad

velocidad constante entre sí. Los físicos llaman a esto un marco de referencia inercial. Como señaló Isaac Newton, un estado inercial es el valor predeterminado para cualquier Objeto sobre el que no actúa una fuerza. El movimiento inercial es un movimiento rectilíneo con velocidad uniforme. Antes de Einstein, prevalecía la idea de Newton sobre el movimiento absoluto: que se podía decir que un objeto se estaba moviendo (o que estaba en reposo) sin referencia a nada más. La relatividad especial pondría fin a esto.

Principio de relatividad

Como bien sabían los científicos del siglo XIX, se genera una corriente eléctrica si se mueve un imán dentro de una bobina de alambre, y también si se mueve la bobina y el imán permanece quieto. Tras los descubrimientos del físico británico Michael Faraday en las décadas de 1820 y 1830, los científicos habían asumido que había dos explicaciones diferentes para este fenómeno: una para la bobina móvil y otra para el imán en movimiento. Einstein no aceptaba nada de eso.

En su artículo de 1905 "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", dijo que no importaba quién se movía, sino el movimiento de uno respecto del otro.

que generó la corriente. Al exponer su "Principio de Relatividad", declaró: "Las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica serán válidas para todos los sistemas de referencia para los cuales las leyes de la mecánica son válidas". En otras palabras, las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales. Era similar a la conclusión a la que había llegado Galileo en 1632.

La luz es una constante.

En las ecuaciones de James Clerk Maxwell de 1865 para calcular las variables en un campo electromagnético, la velocidad de una onda electromagnética, aproximadamente 186.000 millas/s (300.000 km/s), es una constante definido por las propiedades del vacío del espacio a través del cual se mueve. Las ecuaciones de Maxwell son válidas en cualquier sistema inercial. Einstein declaró que, si bien algunas cosas pueden ser relativas, la velocidad de la luz es absoluta y constante: viaja a una velocidad constante, independiente de todo lo demás, incluido el movimiento de la fuente de luz, y no se mide en relación con nada más. Esto es lo que hace que la luz sea fundamentalmente diferente de la materia: todas las velocidades por debajo de esa--

> Si no puedes explicarlo simplemente, no lo entiendes lo suficientemente bien.
>
> **Albert Einstein**

de la luz son relativos al marco de referencia del observador, y nada puede viajar más rápido que la luz. La consecuencia de esto es que dos observadores que se mueven uno respecto del otro siempre medirán la velocidad de un haz de luz como si fuera la misma, incluso si uno se mueve en la misma dirección que el haz de luz y el otro se aleja de él. En términos galileos, esto tenía poco sentido.

Cuestión de tiempo

La idea de que la velocidad de la luz es constante para todos los observadores es fundamental para la relatividad especial. Todo lo demás se deriva de este hecho engañosamente simple. Einstein vio que había una conexión fundamental entre el tiempo y la velocidad de la luz. Fue esta idea la que le llevó a completar su teoría. Incluso si un observador viaja a una velocidad cercana a la de la luz, seguirá registrando un haz de luz que llega a la velocidad de la luz. Para que esto ocurra, decía Einstein, el tiempo para el observador tiene que correr más lentamente.

Newton pensaba que el tiempo era absoluto y que fluía sin referencia a nada más al mismo ritmo constante en cualquier lugar del universo en el que se midiera. Diez segundos para un observador son lo mismo que diez segundos para otro, incluso si uno está parado y el otro pasa corriendo en la nave espacial más rápida disponible.

La física newtoniana establece que la velocidad es igual a la distancia recorrida dividida por el tiempo necesario para cubrir esa distancia, como una ecuación: $v=d/t$. Entonces, si la velocidad de la luz, v, siempre permanece igual, cualesquiera que sean los otros dos valores, entonces se deduce que d y t, la distancia, o el espacio y el tiempo, deben cambiar.

El tiempo, argumentó Einstein, pasa de manera diferente en todos los marcos de referencia en movimiento, lo que significa que los observadores en movimiento relativo (en diferentes marcos de referencia en movimiento) tendrán relojes que funcionarán a velocidades diferentes. El tiempo es relativo. Como dijo Werner Heisenberg sobre el descubrimiento de Einstein: "Este fue un cambio en los fundamentos mismos de la física".

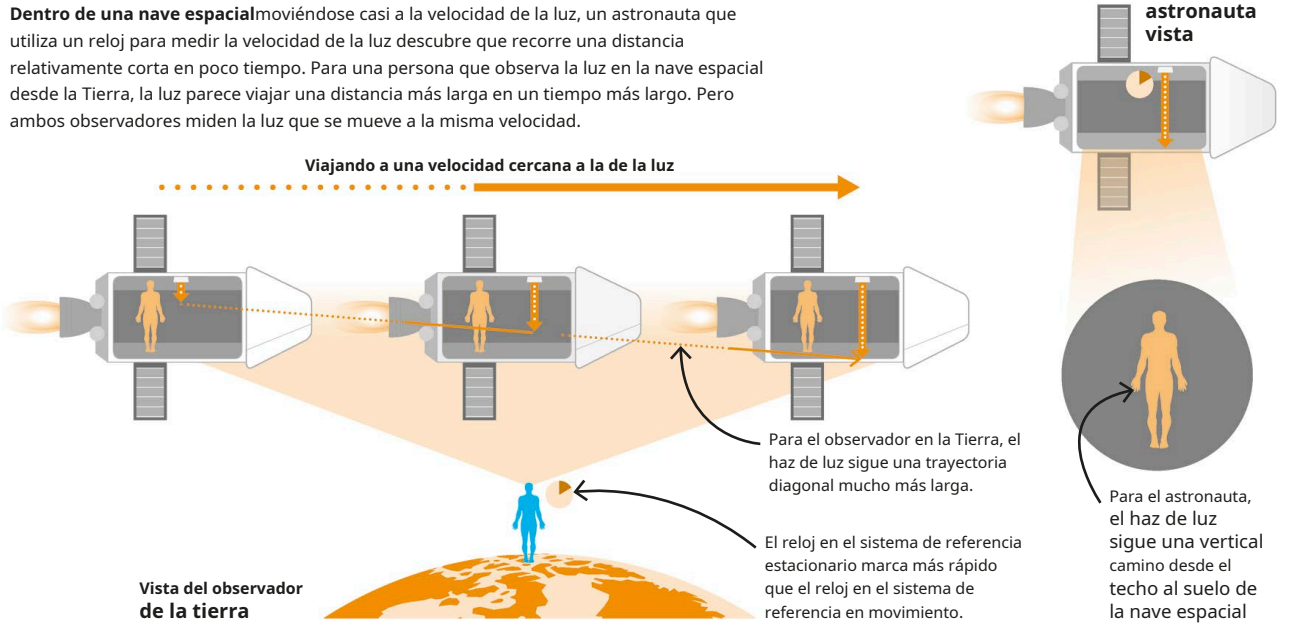
Según la relatividad especial, cuanto más rápido viaja una persona por el espacio, más lentamente viaja en el tiempo. Este fenómeno se llama dilatación del tiempo. Los científicos del Gran Colisionador de Hadrones del CERN, donde se forman partículas
chocados entre sí a velocidades cercanas a la velocidad de la luz, deben tener en cuenta los efectos de la dilatación del tiempo al interpretar los resultados de sus experimentos.

Espacio de contratación

Einstein se hizo una pregunta: si sostuviera un espejo mientras viajaba a la velocidad de la luz, ¿vería mi reflejo? ¿Cómo llegaría la luz al espejo si éste se moviera a la velocidad de la luz? Si la velocidad de la luz es constante, entonces, no importa qué tan rápido se moviera, la luz que va de Einstein al espejo y viceversa siempre viajaría a 300.000 km/s porque la velocidad de la luz no cambia.

Para que la luz llegue al espejo no sólo hay que ralentizar el tiempo, sino también el

Dentro de una nave espacial moviéndose casi a la velocidad de la luz, un astronauta que utiliza un reloj para medir la velocidad de la luz descubre que recorre una distancia relativamente corta en poco tiempo. Para una persona que observa la luz en la nave espacial desde la Tierra, la luz parece viajar una distancia más larga en un tiempo más largo. Pero ambos observadores miden la luz que se mueve a la misma velocidad.



> Einstein, en la teoría especial de la relatividad, demostró que diferentes observadores, en diferentes estados de movimiento, ver realidades diferentes.
>
> **Leonard Susskind**
> **físico americano**

La distancia recorrida por el haz de luz tiene que disminuir. A aproximadamente el 99,5 por ciento de la velocidad de la luz, la distancia se reduce en un factor de 10. Esta contracción sólo se produce en la dirección del movimiento y sólo será evidente para un observador que esté en reposo con respecto al objeto en movimiento. La tripulación de una nave espacial que viaje a una velocidad cercana a la de la luz no percibiría ningún cambio en la longitud de su nave espacial; más bien, verían que el observador parecía contraerse a medida que pasaban.

Una consecuencia de la contracción del espacio es acortar el tiempo que tardaría una nave espacial en viajar a las estrellas. Imaginemos que hay una red ferroviaria cósmica con vías que se extienden de estrella a estrella. Cuanto más rápido viaja una nave espacial, más corta parece ser la trayectoria y, por tanto, más corta es la distancia que debe recorrer para llegar a su destino. Al 99,5 por ciento de la velocidad de la luz, el viaje al

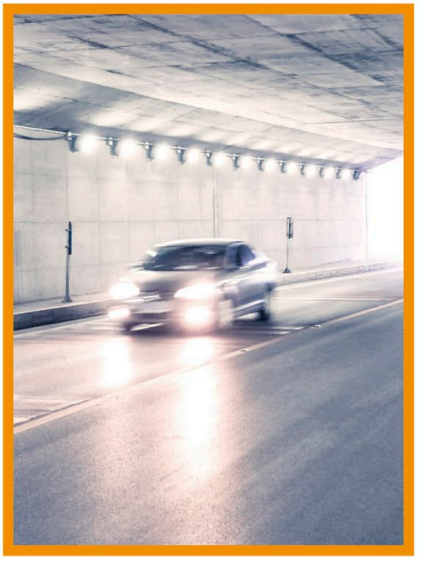
La luz viaja a una velocidad constante., por lo que la velocidad de la luz de los faros de un automóvil no aumentará cuando el vehículo acelere, ni disminuirá cuando el automóvil desacelere.

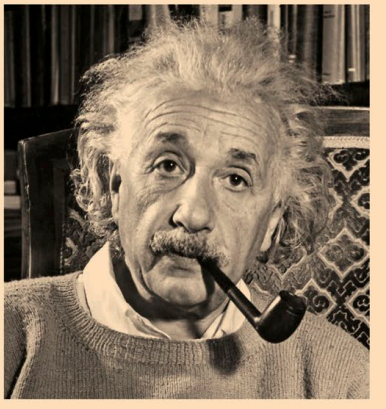
La estrella más cercana tardaría unos cinco meses en tiempo de nave espacial. Sin embargo, para un observador desde la Tierra, el viaje parecería durar más de cuatro años.

La ecuación de Einstein

Una de las ecuaciones más famosas de toda la física se deriva de la relatividad especial. Einstein lo publicó como una especie de breve posdata de su teoría especial. Conocida a veces como la ley de equivalencia masa-energía, $mi=mc^2$ efectivamente dice que la energía (mi) y masa ($metro$) son dos aspectos de la misma cosa. Si un objeto gana o pierde energía, pierde o gana una cantidad equivalente de masa de acuerdo con la fórmula.

Por ejemplo, cuanto más rápido viaja un objeto, mayor es su energía cinética y mayor también es su masa. La velocidad de la luz (C) es un número grande; al cuadrado, es un número muy grande. Esto significa que cuando incluso una pequeña cantidad de materia se convierte en una cantidad equivalente de energía, el rendimiento es colosal, pero también significa que tiene que haber una inmensa entrada de energía para ver un aumento apreciable de masa.





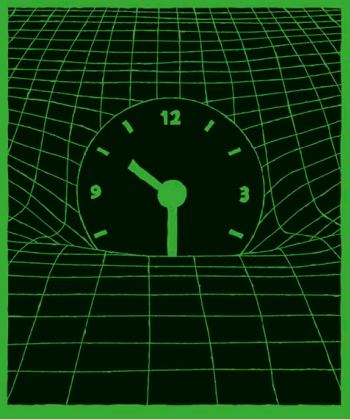
Albert Einstein

Albert Einstein nació en Ulm, Alemania, el 14 de marzo de 1879. Supuestamente lento para aprender a hablar, Einstein declaró más tarde que "muy rara vez pienso con palabras". A los cuatro o cinco años, Albert estaba fascinado por las fuerzas invisibles que hacían que la aguja de una brújula se moviera; dijo que despertó su curiosidad por el mundo. Comenzó a recibir lecciones de violín a la edad de seis años, lo que despertó un amor por la música que perduró durante toda su vida. La historia de que Einstein era malo en matemáticas no es cierta: era un estudiante capaz.

En 1901, Einstein adquirió la ciudadanía suiza y se convirtió en asistente técnico en la Oficina Suiza de Patentes, donde, en su tiempo libre, produjo muchos de sus mejores trabajos. En 1933, emigró a Estados Unidos para ocupar el puesto de profesor de física teórica en Princeton y obtuvo la ciudadanía estadounidense en 1940. Murió el 18 de abril de 1955.

Trabajos clave

1905"Desde un punto de vista heurístico sobre la producción y Transformación de la Luz" **1905**"Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento".



UNA UNIÓN DE ESPACIO Y TIEMPO

ESPACIO-TIEMPO CURVADO

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Hermann Minkowski
(1864-1909)

ANTES

siglo IV *antes de Cristo* El trabajo de Euclides en geometría muestra cómo los antiguos griegos intentaron aplicar las matemáticas al espacio físico.

1637 El filósofo francés René Descartes desarrolla las coordenadas cartesianas y utiliza el álgebra para calcular posiciones.

1813 El matemático alemán Carl Friedrich Gauss sugiere la idea de espacios no euclidianos, que no se ajustan a la geometría euclidiana.

DESPUÉS

1915 Albert Einstein desarrolla su teoría de la relatividad general con la ayuda del trabajo de Hermann Minkowski.

1919 Arthur Eddington ve el espacio-tiempo curvo en acción al observar los cambios de posición de las estrellas durante un eclipse.

El mundo parece ajustarse a ciertas reglas geométricas. Es posible calcular las coordenadas de un punto, por ejemplo, o trazar una forma particular. Esta comprensión básica del mundo, utilizando líneas rectas y ángulos, se conoce como espacio euclidiano, que lleva el nombre de Euclides de Alejandría.

Con la espectacular evolución de la física a principios del siglo XX, surgió la necesidad de una nueva forma de comprender que el universo creció. El matemático alemán Hermann Minkowski se dio cuenta de que gran parte del trabajo de los físicos se entendía más fácilmente si se consideraba en cuatro dimensiones. En el "espacio-tiempo" de Minkowski, tres coordenadas describen dónde está un punto en el espacio, y la cuarta da la hora en que ocurrió un evento allí.

Minkowski observó en 1908 que la Tierra y el universo son curvos y, por tanto, no siguen líneas rectas. De manera similar a cómo un avión sigue una trayectoria curva sobre la Tierra en lugar de una recta, la luz misma se curva alrededor del universo. Esto significa que las coordenadas en el espacio-tiempo no se pueden medir con precisión utilizando líneas rectas y ángulos, y dependen de cálculos detallados llamados formas de geometría no euclidianas.

Estos pueden resultar útiles, por ejemplo, al calcular distancias en la superficie de la Tierra. En el espacio euclidiano, la distancia entre dos puntos se calcularía como si la superficie de la Tierra fuera plana. Pero en espacios no euclidianos, hay que tener en cuenta la curvatura del planeta, utilizando lo que se conoce como geodésicas ("grandes arcos") para obtener un valor más preciso.

> A partir de este momento, el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo hundirse en el fondo.
> **Hermann Minkowski**

Ver también: Medición de distancia 18–19 · El lenguaje de la física 24–31 · Tiempo de medición 38–39 · Relatividad especial 276–279

LA GRAVEDAD ES EQUIVALENTE A ACELERACIÓN

EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Albert Einstein (1879-1955)

ANTES
C. 1590 Galileo Galilei demuestra que dos objetos que caen aceleran a la misma velocidad independientemente de su masa.

1609 astrónomo alemán Johannes Kepler describe lo que sucedería si se detuviera la órbita de la Luna y ésta cayera hacia la Tierra.

1687 La teoría de la gravitación de Isaac Newton incluye la idea del principio de equivalencia.

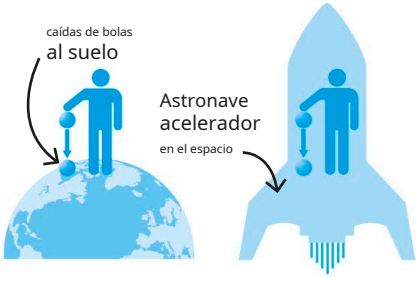
DESPUÉS
1964 Los científicos lanzan masas de prueba de aluminio y oro para demostrar el principio de equivalencia en la Tierra.

1971 El astronauta estadounidense David Scott deja caer un martillo y una pluma sobre la Luna para demostrar que caen al mismo ritmo, como lo predijo Galileo siglos antes.

La teoría de la relatividad especial de Albert Einstein describe cómo se experimentan los objetos. el espacio y el tiempo de manera diferente, dependiendo de su movimiento. Una implicación importante de la relatividad especial es que el espacio y el tiempo siempre están vinculados en un continuo cuatridimensional llamado espaciotiempo. Su última teoría de la relatividad general describe cómo el espacio-tiempo es deformado por objetos masivos. La masa y la energía son equivalentes y la deformación que provocan en el espacio-tiempo crea los efectos de la gravedad.

Einstein basó su teoría de la relatividad general de 1915 en el principio de equivalencia: la idea de que la masa inercial y la masa gravitacional tienen el mismo valor. Esto fue observado por primera vez por Galileo e Isaac Newton en el siglo XVII, y luego desarrollado por Einstein en 1907. Cuando se aplica una fuerza a un objeto, la masa inercial de ese objeto se puede calcular midiendo su aceleración. La masa gravitacional de un objeto se puede calcular midiendo la fuerza de gravedad. Ambos cálculos producirán el mismo número.

En una nave espacial acelerada, una pelota que se deja caer se comportaría exactamente de la misma manera que una pelota que se deja caer en el campo gravitacional de la Tierra.



Si una persona en una nave espacial estacionaria en la Tierra deja caer un objeto, la masa medida del objeto será la misma que si esa persona estuviera en una nave espacial acelerada en el espacio. Einstein dijo que es imposible saber si una persona está en un campo gravitacional uniforme o acelerando en el espacio usando este enfoque.

Einstein continuó imaginando cómo sería un rayo de luz para la persona dentro de la nave espacial. Llegó a la conclusión de que una gravedad poderosa y una aceleración extrema tendrían el mismo efecto: el rayo de luz se curvaría hacia abajo.

Ver también: Caída libre 32–35 · Leyes de la gravedad 46–51 · Relatividad especial 276–279 · Curvar el espacio-tiempo 280 · Masa y energía 284–285

PORQUE ES EL DE VIAJE

¿GEMELO MÁS JOVEN?

PARADOJAS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Paul Langevin(1872-1946)

ANTES
1905 Albert Einstein postula que un reloj en movimiento experimentará menos tiempo que uno estacionario.

1911 Einstein continúa sugiriendo que una persona en movimiento será más joven que una persona estática.

DESPUÉS
1971 Los físicos estadounidenses Joseph Hafele y Richard Keating demuestran que la teoría de Einstein sobre la dilatación del tiempo es correcta tomando relojes atómicos a bordo de aviones y comparándolos con relojes atómicos en tierra.

1978 También se ha descubierto que los primeros satélites GPS experimentan dilatación del tiempo.

2019 La NASA lanza un reloj atómico diseñado para ser utilizado en el espacio profundo.

Las teorías de la relatividad de Albert Einstein han impulsado a los científicos a explorar cómo se comportan la luz y otros objetos cuando llegan a los extremos del tiempo, el espacio y el movimiento (por ejemplo, cuando un objeto en movimiento se acerca a la velocidad de la luz). Pero también han dado lugar a algunos experimentos mentales interesantes que, en principio, parecen irresolubles.

Uno de los experimentos mentales más conocidos es la "paradoja de los gemelos". Esto fue propuesto por primera vez por el físico francés Paul Langevin en 1911. Basándose en la teoría de Einstein

> Regresando a la Tierra, habiendo envejecido dos años, [el viajero] saldrá de su vehículo y encontrar nuestro globo envejecido al menos doscientos años...
> **Paul Langevin**

En su trabajo, Langevin sugirió la paradoja basándose en una consecuencia conocida de la dilatación del tiempo de la relatividad. Esto significa que cualquier objeto que se mueva más rápido que un observador, éste verá que experimenta el tiempo más lentamente. Cuanto más rápido se mueve el objeto, más lentamente se verá que experimenta el tiempo.

Langevin se preguntó qué pasaría si hubiera hermanos gemelos idénticos en la Tierra y uno de ellos fuera enviado al espacio en un viaje muy rápido a otra estrella y de regreso. El gemelo en la Tierra diría que el viajero se estaba moviendo, por lo que el viajero sería el más joven de los dos cuando regresara. Pero el viajero argumentaría que el gemelo en la Tierra se estaba moviendo y que él estaba estacionario. Por tanto, diría que el gemelo de la Tierra sería más joven.

Hay dos soluciones a esta aparente paradoja. La primera es que el viajero debe cambiar su velocidad para regresar a casa, mientras que el gemelo en la Tierra permanece a una velocidad constante, por lo que el viajero será más joven. La otra solución es que el viajero abandone el marco de referencia de la Tierra, mientras que el gemelo en la Tierra

Ver también: Tiempo de medición 38–39 · De la relatividad clásica a la relatividad especial 274 · La velocidad de la luz 275 Relatividad especial 276–279 · Curvar el espacio-tiempo 280

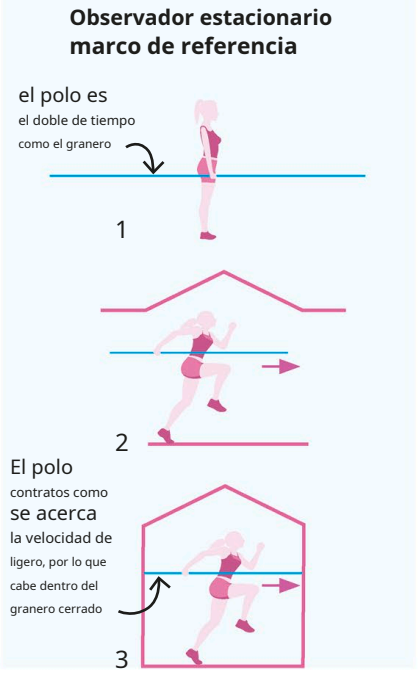
permanece allí, es decir que el viajero dicta los acontecimientos que sucederán.

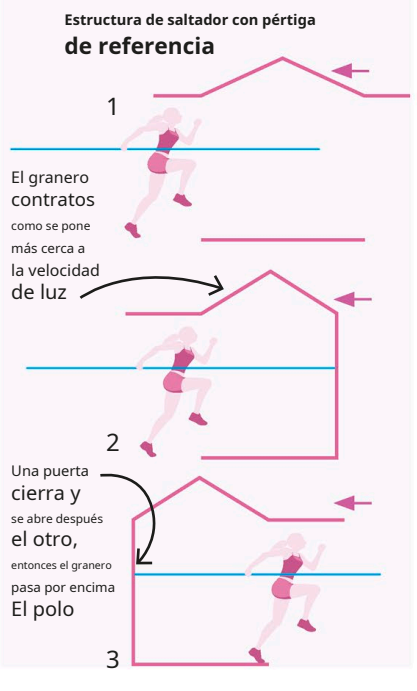
La paradoja del poste de granero

En la "paradoja del granero", un saltador con pértiga corre a través de un granero casi a la velocidad de la luz, con un palo dos veces más largo que el granero. Mientras el saltador con pértiga está dentro del granero, ambas puertas del granero se cierran simultáneamente y luego se abren nuevamente. ¿Es posible que el poste quepa dentro del granero mientras las puertas están cerradas?

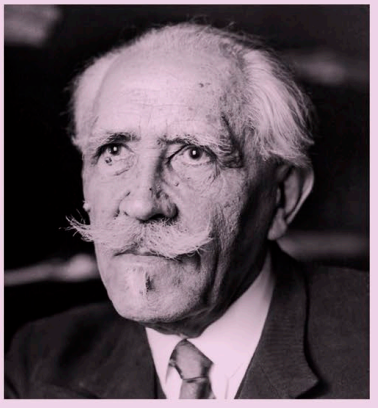
Desde el marco de referencia de alguien que observa, cuando algo se acerca a la velocidad de la luz, parece acortarse, en un proceso conocido como contracción de longitud. Sin embargo, desde el marco de referencia del saltador con pértiga, el granero se mueve hacia ella a la velocidad de la luz; ella no se mueve. Entonces el granero se contraería y el poste no encajaría.

La solución es que existen algunas inconsistencias que permiten que el poste encaje. Desde el punto de referencia del observador, el poste es lo suficientemente pequeño como para caber dentro antes de que las puertas del granero se abran nuevamente para permitir que el poste salga. Desde la perspectiva del saltador con pértiga, las puertas no se cierran y abren simultáneamente, sino una tras otra, permitiendo que la pértiga entre por un extremo y escape por el otro.





El espacio alrededor de un objeto en movimiento se contrae. a medida que el objeto se acerca a la velocidad de la luz. Un observador estacionario que observara cómo el poste llega al granero lo vería contraerse, permitiéndole entrar. Para el saltador con pértiga, el granero se contrae, pero como las puertas no se abren y cierran simultáneamente, puede pasar por encima de ella.



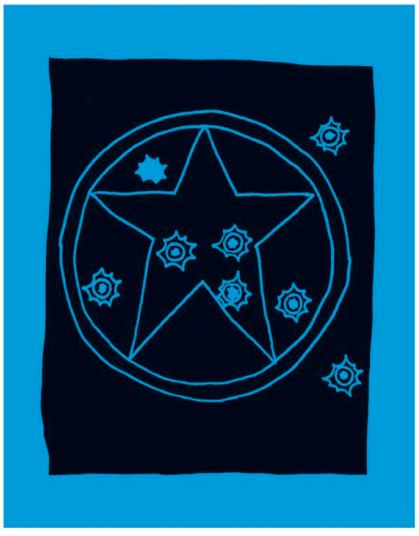
Paul Langevin

Paul Langevin nació en París el 23 de enero de 1872. Después de estudiar ciencias en la capital francesa, se mudó a Inglaterra para estudiar con JJ Thomson en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge. Luego regresó a la Sorbona de París para doctorarse en física en 1902. Se convirtió en profesor de física en el Collège de France en 1904 y luego en director de la Escuela de Física y Química en 1926. Fue elegido miembro de la Academia de Ciencias en 1934.

Langevin era mejor conocido por su trabajo sobre el magnetismo, pero también se basó en el trabajo de Pierre Curie al final de la Primera Guerra Mundial para idear una forma de encontrar submarinos mediante la ecolocalización. También ayudó a difundir las teorías de Albert Einstein en Francia. En la década de 1930, fue arrestado por el gobierno francés de Vichy por oponerse al fascismo y pasó la mayor parte de la Segunda Guerra Mundial bajo arresto domiciliario. Langevin murió el 19 de diciembre de 1946, a la edad de 74 años.

Trabajos clave

1908 "Sobre la teoría del movimiento browniano"
1911 "La evolución del espacio y el tiempo"



EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS Y VIDA

MASA Y ENERGÍA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Arturo Eddington
(1882-1944)

ANTES
1905 Albert Einstein ideó por primera vez la equivalencia masa-energía, siendo la ecuación inicial l/V_2.

1916 Einstein titula un artículo con la ecuación $mi=mc_2$.

DESPUÉS
1939 El físico alemán Hans Bethe realiza un análisis detallado de la cadena de fusión del hidrógeno que alimenta estrellas como el Sol.

1942 En Chicago se construye el primer reactor nuclear del mundo, el Chicago Pile-1 (CP-1).

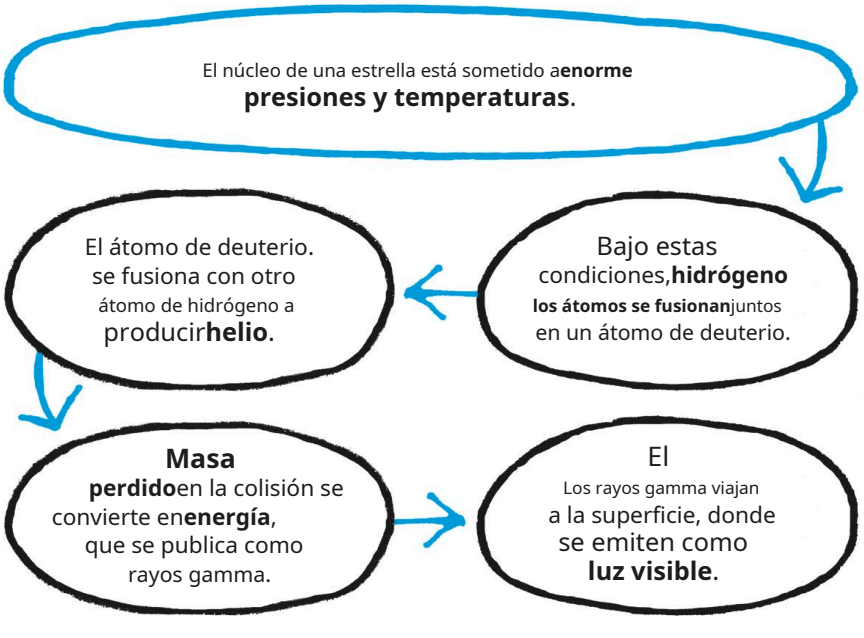
1945 Trinity, la primera bomba nuclear del mundo, es probada por el ejército estadounidense en Nuevo México.

2008 Entra en funcionamiento el mayor acelerador de partículas del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN en Suiza.

t la famosa ecuación $mi=mc_2$ ha tomado varios formas a lo largo de los años, y Es difícil exagerar su impacto en la física. Fue ideado por Albert Einstein en 1905 y se refería a la equivalencia masa-energía: esa energía (mi) es igual a masa ($metro$) multiplicado por el cuadrado de la velocidad de la luz (C_2). Según la teoría de la relatividad de Einstein, la ecuación se puede utilizar para calcular la energía de una masa dada y calcular cualquier cambio que haya ocurrido en una reacción nuclear.

Reacción en cadena

La ecuación de Einstein demostró que la masa y la energía estaban vinculadas de maneras que no se creían posibles, y que una pequeña pérdida de masa podía ir acompañada de una enorme liberación de energía. Una de las principales implicaciones de esto fue en



Ver también: Energía y movimiento 56–57 · Luz del átomo 196–199 · Nuclear bombas y potencia 248–251 · La velocidad de la luz 275 · Relatividad especial 276–279

Comprender cómo las estrellas producen energía. Hasta el trabajo pionero del físico británico Arthur Eddington a principios del siglo XX, los científicos no podían explicar cómo estrellas como el Sol irradiaban con tanta intensidad.

Cuando un átomo inestable (radiactivo) es golpeado por otra partícula, como un neutrón, puede dividirse en nuevas partículas. Estos pueden chocar con otros átomos y provocar una reacción en cadena, en la que parte de la masa perdida en cada colisión se convierte en nuevas partículas y el resto se libera en forma de energía. En 1920, Eddington sugirió que ciertos elementos dentro de las estrellas podrían estar pasando por un proceso similar para producir energía.

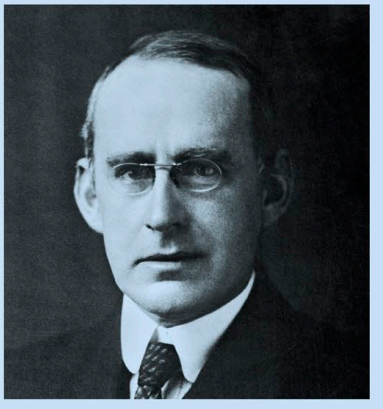
Reacciones nucleares

Eddington propuso que las estrellas estaban convirtiendo el hidrógeno en helio y otros elementos más pesados, un proceso que ahora se llama fusión nuclear, y que esto podría explicar su producción de energía (la luz visible que producen). Utilizando la ecuación de Einstein, describió cómo el intenso calor y la presión en el núcleo de una estrella podrían permitir que se produjeran reacciones nucleares, destruyendo masa y liberando energía.

Hoy en día, el conocimiento de cómo se puede convertir la masa en energía ha permitido a los físicos replicarla en reactores nucleares, que utilizan el proceso de fisión nuclear: la división de un átomo pesado en dos más ligeros. También condujo a la creación de la bomba atómica, en la que se produce una reacción en cadena imparable que libera una cantidad poderosa y mortal de energía. Los aceleradores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones se basan en la ecuación de Einstein para aplastar partículas y crear otras nuevas. Cuanta más energía hay en una colisión, mayor es la masa de las partículas que se crean.

Los físicos ahora están tratando de recrear el proceso de fusión nuclear, que produciría más energía que la fisión nuclear pero requiere condiciones tan extremas que son difíciles de replicar. Se espera que en las próximas décadas la fusión nuclear pueda ser una fuente viable de energía en la Tierra.

el sol libera enormes cantidades de energía al convertir hidrógeno en helio en el proceso de fusión nuclear. Se dice que tiene suficiente hidrógeno para seguir brillando durante los próximos 5 mil millones de años.



Arturo Eddington

Arthur Eddington nació en 1882 en Westmorland (ahora Cumbria), Reino Unido. Estudió en Manchester y luego en el Trinity College de Cambridge, donde obtuvo honores por su trabajo. De 1906 a 1913 fue asistente jefe del Real Observatorio de Greenwich.

Los padres de Eddington eran cuáqueros, por lo que fue pacifista durante la Primera Guerra Mundial. Hizo importantes contribuciones a la ciencia desde 1914 en adelante y fue el primero en exponer la teoría de la relatividad de Einstein en idioma inglés. En 1919, viajó a Príncipe, frente a la costa occidental de África, para observar un eclipse solar y demostrar la idea de las lentes gravitacionales (que las grandes masas desvían la luz, como predice la teoría de la relatividad general de Einstein) en el proceso. Publicó artículos sobre la gravedad, el espacio-tiempo y la relatividad, y produjo su obra maestra sobre la fusión nuclear en las estrellas en 1926. Murió en 1944, a la edad de 61 años.

Trabajos clave

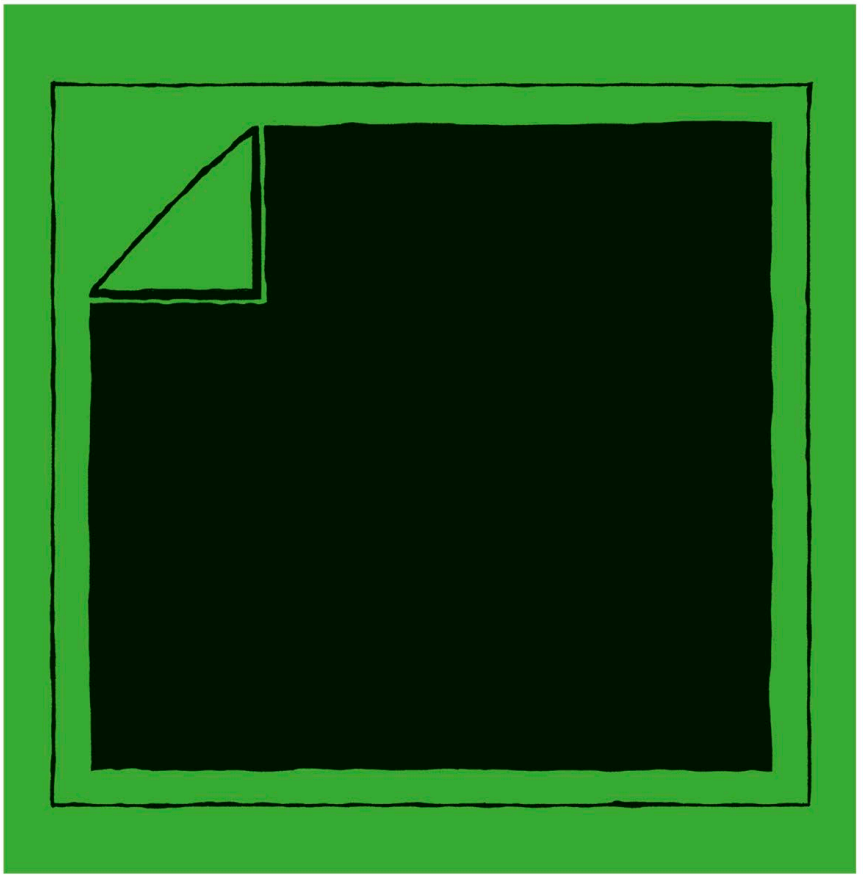
1923 *La Matemática Teoría de la relatividad*
1926 *La Constitución Interna de las Estrellas*

DÓNDE

TIEMPO ESPACIAL

SIMPLEMENTE TERMINA

AGUJEROS NEGROS Y AGUJEROS DE GUSANO



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Karl Schwarzschild
(1873-1916)

ANTES
1784 John Michell propone la idea de "estrellas oscuras", que atrapan la luz con su intensa gravedad.

1796 El estudioso francés Pierre-Simon Laplace predice la existencia de grandes objetos invisibles en el universo.

DESPUÉS
1931indio-americano
El astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar propone un límite de masa para la formación de un agujero negro.

1971 El primer agujero negro, Cygnus X-1, se descubre indirectamente en la Vía Láctea.

2019 Un equipo global de astrónomos revela la primera imagen de un agujero negro.

La idea de agujeros negros y agujeros de gusano se ha hablado durante siglos, pero Sólo recientemente los científicos han comenzado a comprenderlos y, con ellos, el universo en general. Hoy en día, los científicos están empezando a apreciar lo impresionantes que son los agujeros negros, e incluso han logrado tomar una fotografía de uno de ellos: prueba indiscutible de que existen.

El clérigo británico John Michell fue el primero en pensar en los agujeros negros, sugiriendo en la década de 1780 que podría haber estrellas con una gravedad tan intensa que nada, ni siquiera la luz, podría escapar. Llamó a estas "estrellas oscuras" y dijo que, si bien serían esencialmente invisibles,

Ver también: Caída libre 32–35 · Leyes de la gravedad 46–51 · Partículas y ondas 212–215 · De la relatividad clásica a la relatividad especial 274 · Relatividad especial 276–279 · Curvar el espacio-tiempo 280 · El principio de equivalencia 281 · Ondas gravitacionales 312–315

El **masa gravitacional** de un objeto **deforma el espacio-tiempo**.

Si un objeto es **comprimido más allá de cierto punto**, se convierte en un agujero negro. Este punto es su **radio de Schwarzschild**—el radio del horizonte de sucesos.

El **gravedad** de un agujero negro, o **singularidad**, deforma el espacio-tiempo para tal medida que **nada puede escapar de ello**—ni siquiera luz.

Nadie sabe lo que sucede **mas alla del límite**, u horizonte de sucesos, de un agujero negro.

En teoría, debería ser posible ver sus efectos gravitacionales sobre otros objetos.

Sin embargo, en 1803, el médico británico Thomas Young demostró que la luz es una onda, en lugar de una partícula, lo que llevó a los científicos a preguntarse si la gravedad la afectaría en absoluto. La idea de Michell fue dejada de lado y en gran medida olvidada hasta 1915, cuando Albert Einstein ideó su teoría general de la relatividad y sugirió que la masa de un objeto podía desviar la luz misma.

No hay escapatoria

Al año siguiente, el físico alemán Karl Schwarzschild llevó la idea de Einstein al extremo. Sugirió que si una masa se condensara lo suficiente, crearía un campo gravitacional del que no Incluso la luz podría escapar, siendo su borde lo que se llama horizonte de sucesos. Similar a la idea de la "estrella oscura" de Michell, esto más tarde se conoció como "agujero negro".

Schwarzschild produjo una ecuación que le permitió calcular el radio de Schwarzschild (el radio del horizonte de sucesos) para cualquier masa dada. Si un objeto se comprime en un volumen tan denso que cabe dentro de ese radio, deformará el espacio-tiempo hasta tal punto que nada podrá escapar de su atracción gravitacional: colapsará en una singularidad o en el centro de un agujero negro. Schwarzschild, sin embargo, no creía que realmente pudiera existir una singularidad. Lo vio como un punto algo teórico en el que alguna propiedad es infinita, que, en el caso de un agujero negro, es la densidad de la materia.

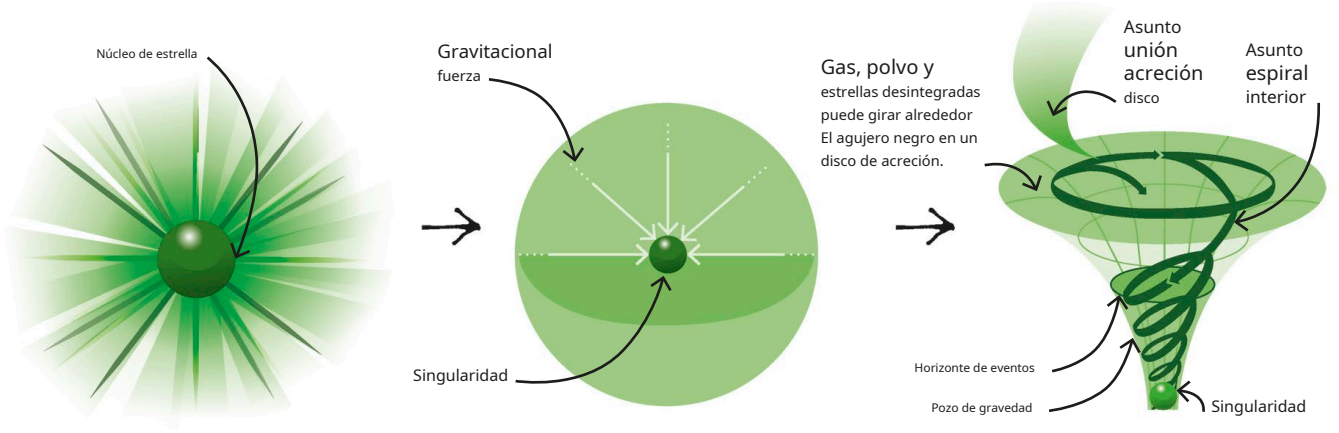
Aun así, el trabajo de Schwarzschild demostró que los agujeros negros podían existir matemáticamente, algo que muchos científicos no habían creído posible. Hoy en día, los astrónomos utilizan sus ecuaciones para estimar las masas de los agujeros negros, aunque no con mucha precisión, ya que no se pueden explicar su rotación y carga eléctrica. A principios del siglo XX, los hallazgos de Schwarzschild permitieron a los científicos comenzar a contemplar lo que podría suceder cerca o incluso dentro de un agujero negro.

límite de masa

Un factor importante fue descubrir cómo se formaban los agujeros negros, algo propuesto en 1931 por Subrahmanyan Chandrasekhar. Utilizó la teoría de la relatividad especial de Einstein para demostrar que existe un límite de masa por debajo del cual una estrella al final de su vida colapsará y se convertirá en una estrella estable, más pequeña y densa, conocida como enana blanca. Si los restos de la masa de la estrella están por encima de este límite, que Chandrasekhar calculó como 1,4 veces la masa del sol, colapsará aún más y se convertirá en una estrella de neutrones o en un agujero negro.

> El destino final de las estrellas masivas es colapsar detrás de un horizonte de sucesos para formar un 'agujero negro' que contendrá una singularidad.
>
> **Stephen Hawking**

Agujeros negros



Cuando muere una estrella masiva, colapsa, incapaz de resistir la fuerza aplastante de su propia gravedad. Esto provoca una explosión de supernova y las partes exteriores de la estrella son lanzadas al espacio.

Si el núcleo que quedadespués de que la supernova sigue siendo masiva (más de 1,4 veces la masa del Sol), sigue encogiéndose y colapsa bajo su propio peso en un punto de densidad infinita: una singularidad.

La singularidad es ahora tan densa que distorsiona el espacio-tiempo a su alrededor de modo que ni siquiera la luz puede escapar. Este agujero negro se representa en dos dimensiones como un agujero infinitamente profundo llamado pozo de gravedad.

En 1939, los físicos estadounidenses Robert Oppenheimer y Hartland Snyder propusieron una idea más moderna de agujero negro. Describieron cómo el tipo de cuerpo que Schwarzschild había imaginado sería detectable sólo por su influencia gravitacional. Otros ya habían considerado la peculiar física que tendría lugar dentro de un agujero negro, incluido el astrónomo belga Georges Lemaître en 1933. Su experimento mental "Alice y Bob" suponía que si Bob fuera testigo de cómo Alice caía en un agujero negro, ella parecería Se congelaría en su borde (el límite invisible llamado horizonte de sucesos), pero experimentaría algo completamente diferente cuando cayera dentro de sus límites.

Hubo que esperar hasta 1964 para que se produjera el siguiente gran acontecimiento, cuando el físico británico Roger Penrose sugirió que si una estrella implosionaba con suficiente fuerza, siempre produciría una singularidad.

como el que había propuesto Schwarzschild. Tres años después, nació el término "agujero negro" durante una charla del físico estadounidense John Wheeler. Ya se le había ocurrido un término para describir los túneles teóricos en el espacio-tiempo: "agujeros de gusano".

Muchos físicos ya estaban considerando la idea de los agujeros de gusano. La noción de un agujero blanco, en el que el horizonte de sucesos no impediría que la luz escapara, sino más bien impediría su entrada, progresó hacia la idea de que los agujeros negros y los agujeros blancos podrían estar vinculados. Utilizando materia exótica, que implica densidades de energía negativas y presión negativa, se sugirió que la información podría pasar a través de un agujero de gusano de un extremo al otro, tal vez entre un agujero negro y uno blanco, o incluso dos agujeros negros, a través de vastos
distancias de espacio y tiempo.

En realidad, sin embargo, la existencia de agujeros de gusano sigue siendo cuestionable. Aunque los científicos creen que pueden

Aunque se producen a nivel microscópico, hasta ahora los intentos de elaborar versiones más grandes no han tenido éxito. Sin embargo, la idea de ellos persiste hoy en día y, con ella, la muy vaga posibilidad de que los humanos puedan atravesar grandes distancias en el universo con facilidad.

buscando pruebas

Si bien abundaban las teorías, nadie había sido capaz todavía de detectar un agujero negro, y mucho menos un agujero de gusano. Pero en 1971, los astrónomos observaron una extraña fuente de rayos X en la constelación de Cygnus. Sugirieron que estos rayos X, denominados Cygnus X-1, eran el resultado de una estrella azul brillante que fue destrozada por un objeto grande y oscuro. Por fin, los astrónomos habían presenciado su primer agujero negro, no viéndolo directamente, sino viendo su efecto en un objeto cercano.

A partir de ahí, la teoría de los agujeros negros ganó popularidad. Los físicos produjeron ideas novedosas sobre cómo podrían comportarse los agujeros negros, entre ellas

Ellos fueron Stephen Hawking, a quien en 1974 se le ocurrió la idea de que los agujeros negros podrían emitir partículas (ahora conocida como radiación de Hawking). Sugirió que la fuerte gravedad de un agujero negro podría producir pares de partículas y antipartículas, algo que se cree que sucede en el mundo cuántico. Mientras que una del par partícula-antipartícula sería arrastrada hacia el agujero negro, la otra escaparía, llevando consigo información sobre el horizonte de sucesos, el Extraño límite más allá del cual ninguna masa o luz puede escapar.

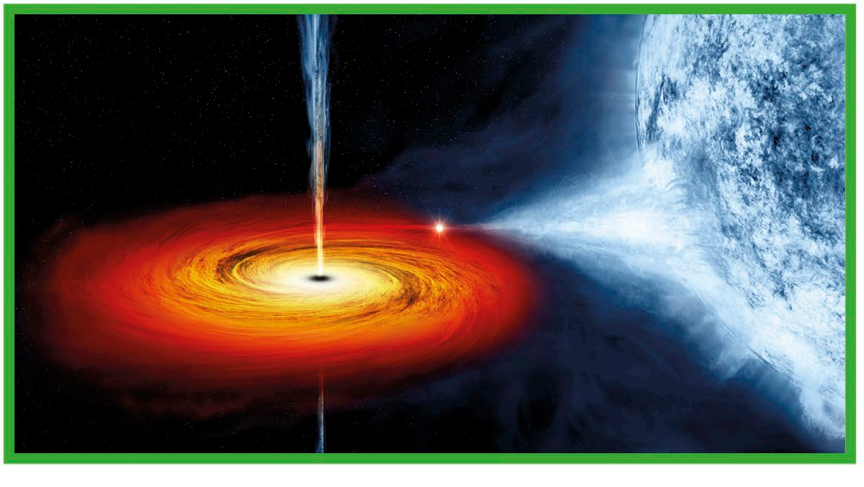
Agujeros negros supermasivos

También se imaginaron agujeros negros de diferentes formas y tamaños. Se pensaba que los agujeros negros estelares, como Cygnus X-1, contenían entre 10 y 100 veces la masa del Sol aplastada en un área de decenas de kilómetros de diámetro. Pero también se pensaba que los agujeros negros podrían fusionarse para formar un agujero negro supermasivo, que contendría millones o miles de millones de veces la masa del Sol en un área de millones de kilómetros de diámetro.

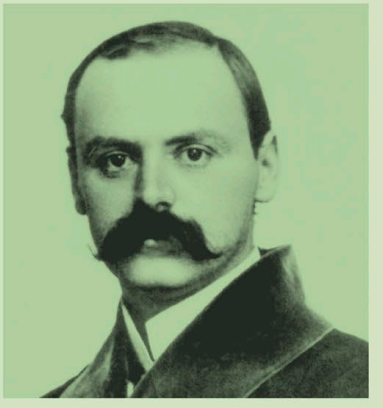
Se cree que casi todas las galaxias tienen un agujero negro supermasivo en su núcleo, posiblemente rodeado por un disco de acreción giratorio de polvo y gas sobrecalentados, que pueden verse incluso a grandes distancias. Alrededor del agujero negro supermasivo que se cree que está en el centro de la Vía Láctea, los astrónomos han visto lo que creen que son estrellas que lo orbitan, la misma idea sugerida por Michell allá por el siglo XVIII.

El momento más importante en la historia de la teoría de los agujeros negros hasta ahora llegó en abril de 2019, cuando los astrónomos de una colaboración internacional llamada Event Horizon Telescope (EHT) revelaron la primera imagen de un agujero negro. Utilizando múltiples telescopios alrededor del mundo para crear un supertelescopio virtual, pudieron fotografiar el agujero negro supermasivo en una galaxia llamada Messier 87, a 53 millones de años luz de distancia. La imagen estuvo a la altura de todas las predicciones, con un anillo de luz rodeando un centro oscuro.

Cuando el universo termine dentro de billones de años, se cree que los agujeros negros serán lo único que quedará a medida que aumente la entropía (la energía no disponible en el universo). Finalmente, ellos también se evaporarán.



En esta ilustración, el agujero negro Cygnus X-1 atrae hacia sí material de una estrella compañera azul. El material forma un disco rojo y naranja que gira alrededor del agujero negro.



Karl Schwarzschild

Nacido en Frankfurt, Alemania, en 1873, Karl Schwarzschild mostró un talento temprano para la ciencia y publicó un artículo sobre las órbitas de los objetos celestes cuando tenía 16 años. Se convirtió en profesor en la Universidad de Göttingen en 1901 y director del Observatorio Astrofísico de Potsdam en 1909.

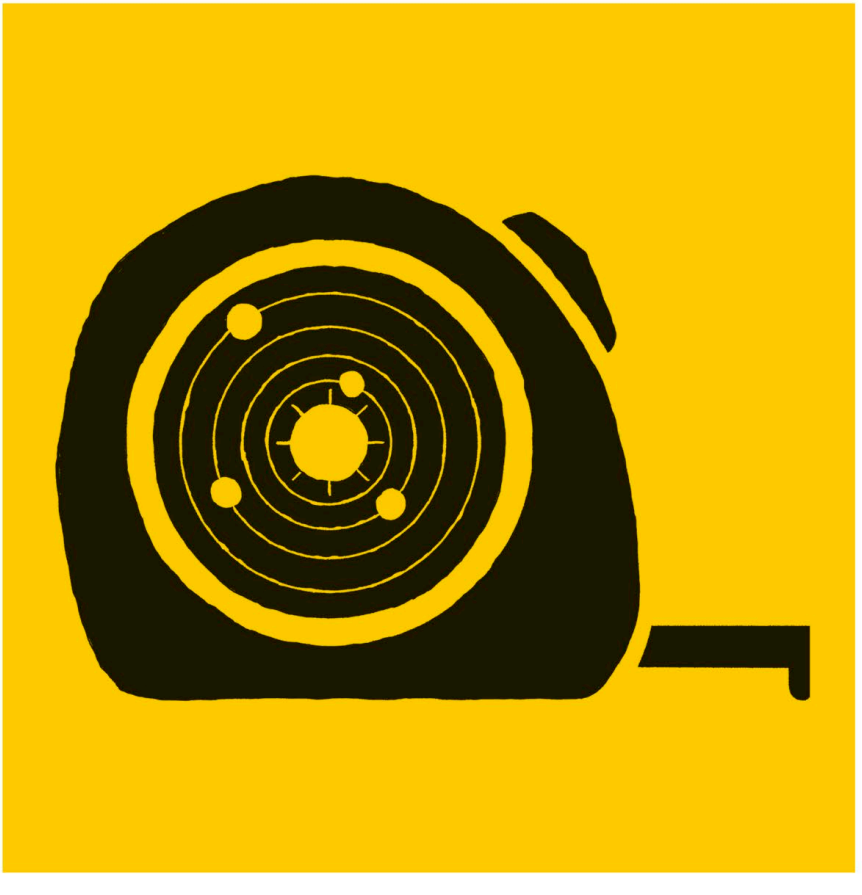
Uno de los de Schwarzschild Las principales contribuciones a la ciencia se produjeron en 1916, cuando produjo la primera solución de las ecuaciones de gravedad de Einstein a partir de la teoría de la relatividad general. Demostró que los objetos de una masa suficientemente alta tendrían una velocidad de escape (la velocidad necesaria para escapar de su atracción gravitacional) superior a la velocidad de la luz. Este fue el primer paso para comprender los agujeros negros y, en última instancia, condujo a la idea de un horizonte de sucesos. Schwarzschild murió de una enfermedad autoinmune en 1916, mientras servía en el frente ruso en la Primera Guerra Mundial.

Obra clave

1916 *Sobre el campo gravitacional de un punto de masa según la teoría de Einstein*

LA FRONTERA DE LO CONOCIDO UNIVERSO

DESCUBRIENDO OTRAS GALAXIAS



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Henrietta Swan Leavitt (1868-1921),
Edwin Hubble(1889-1953)

ANTES
964 El astrónomo persa Abd al-Rahman al-Sufi es la primera persona en observar Andrómeda, aunque no se da cuenta de que se trata de otra galaxia.

1610 Galileo Galilei propone que la Vía Láctea está formada por muchas estrellas después de observarla a través de su telescopio.

DESPUÉS
1953 El astrónomo francés Gérard de Vaucouleurs descubrió que las galaxias cercanas a la Tierra forman parte de un supercúmulo, llamado Cúmulo de Virgo.

2016 Un estudio dirigido por el astrofísico estadounidense Christopher Conselice revela que el universo conocido contiene dos billones de galaxias.

Después de la publicación del modelo heliocéntrico del universo de Copérnico en 1543, que colocaba al Sol en lugar de la Tierra en su centro, los intentos posteriores de comprender el tamaño y la estructura del universo lograron pocos avances. Pasaron casi 400 años antes de que los astrofísicos se dieran cuenta de que el Sol no sólo no era el centro del universo, como había pensado Copérnico, sino que ni siquiera era el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea.

En la década de 1920, el descubrimiento de Edwin Hubble de que la Vía Láctea es sólo una de las muchas galaxias del universo marcó un importante avance en el conocimiento astronómico.

Ver también: El efecto Doppler y el corrimiento al rojo 188–191 · Modelos del universo 272–273 Lo estático o en expansión. universo 294–295

Variables cefeidas(un tipo de estrella) se puede utilizar para **medir distancias**.

Su**período de pulso**(período de fluctuación en su brillo) está relacionado con su**verdadero brillo**.

Midiendo el período de la estrella ayuda**calcular su verdad brillo**.

Al medir la cantidad de el**La luz de la estrella llega a la Tierra**, es**distancia de la tierra**se puede calcular.

Algunas estrellas son**muy lejos de Tierra**que deben ser **fuera de nuestra Vía Láctea**.

La Vía Láctea no es la única galaxia.

La clave de este avance fue una nueva forma de medir distancias en el espacio hecha posible gracias al trabajo de la astrónoma estadounidense Henrietta Swan Leavitt en 1908.

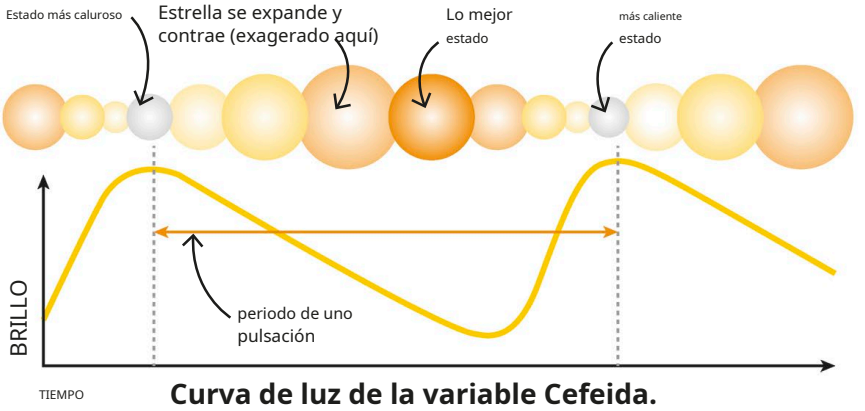
Determinando la distancia

A principios del siglo XX, establecer la distancia entre una estrella y la Tierra no era una tarea fácil. Dentro de la Vía Láctea, las distancias entre objetos podrían medirse mediante paralaje, un proceso que emplea trigonometría básica. Al medir los ángulos de las líneas de visión hacia un objeto desde ambos lados de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, por ejemplo, los astrónomos pueden calcular el ángulo donde convergen las dos líneas de visión y, por tanto, la distancia a ese objeto. Sin embargo, para distancias superiores a 100 años luz y fuera de la Vía Láctea, el paralaje es demasiado impreciso. Los astrónomos de principios del siglo XX necesitaban otro método.

En ese momento, Leavitt trabajaba como "computadora", nombre dado a los procesadores de datos en el Observatorio de la Universidad de Harvard en Cambridge, Massachusetts. Eduardo Carlos Pickering, que dirigía el observatorio, había pedido a Leavitt que midiera el brillo de las estrellas en una colección de placas fotográficas que mostraban las Nubes de Magallanes, ahora conocidas como pequeñas galaxias fuera de la Vía Láctea.

En el curso de este trabajo, Leavitt descubrió una clase de estrellas muy brillantes llamadas Cefeidas variables cuya luminosidad fluctúa a medida que pulsan. Cada una de estas estrellas pulsa en un ciclo o período que se repite regularmente, dependiendo de los cambios físicos dentro de la estrella. Comprimida por la gravedad, la estrella se vuelve más pequeña, más opaca y gradualmente más caliente a medida que la energía luminosa atrapada en su interior comienza a acumularse. Finalmente, el calor extremo hace que el gas de las capas exteriores se expanda y la estrella se vuelva más transparente, permitiendo que la luz-

Las estrellas variables cefeidas pulsan—expandirse y contraerse durante un ciclo regular, lo que resulta en temperaturas y brillo variables. Los astrónomos pueden trazar su brillo cambiante a lo largo del tiempo en una curva de luz.

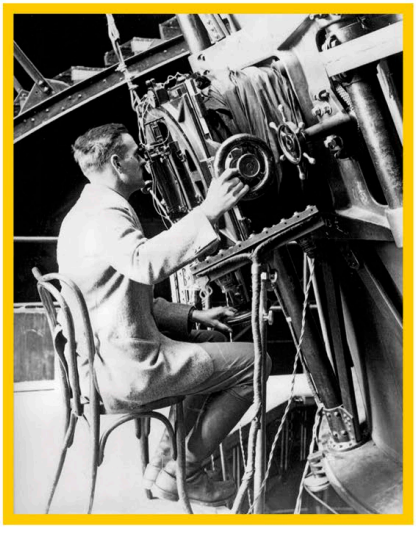


Curva de luz de la variable Cefeida.

> Dado que las variables [cefeidas] probablemente se encuentren casi a la misma distancia de la Tierra, sus períodos aparentemente están asociados con su edad real emisión de luz.
> **Henrietta Swan Leavitt**

energía para atravesarlo. Sin embargo, a medida que la estrella se expande, también se enfría y las fuerzas gravitacionales eventualmente superan la presión de expansión hacia afuera. En este punto, la estrella se hace más pequeña y el proceso se repite.

Leavitt observó que los ciclos de las estrellas variaban entre dos y sesenta días, y que las estrellas más brillantes permanecían más tiempo en su lugar. máxima luminosidad. Como todas las estrellas estaban en las Nubes de Magallanes, Leavitt sabía que cualquier diferencia entre las estrellas



Las luminosidades tenían que deberse a su brillo intrínseco y no a lo lejos que se encontraban de la Tierra.

una nueva herramienta

Leavitt publicó sus hallazgos en 1912, creando un gráfico que muestra los períodos de 25 variables cefeidas, indicando su "luminosidad verdadera" y cuán brillantes parecían desde la Tierra, su "luminosidad aparente". La importancia del descubrimiento de Leavitt fue que una vez que Si la distancia de una variable cefeida se hubiera calculado usando paralaje, la distancia de variables cefeidas de período comparable en estrellas más allá de los límites del paralaje podría calcularse comparando la "luminosidad verdadera" establecida por su período con la "luminosidad aparente": la cantidad que se había atenuado cuando su luz llegó a la Tierra.

Un año después del descubrimiento de Leavitt, el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung creó una escala de luminosidad de variables cefeidas. Estas estrellas fueron designadas como "velas estándar", puntos de referencia para calcular las distancias cósmicas de los objetos. Durante la siguiente década, otros astrónomos comenzaron a utilizar el trabajo de Leavitt y Hertzsprung para calcular la distancia a las estrellas.

El gran debate

El uso de variables cefeidas no era un método perfecto para determinar la distancia (no podía tener en cuenta el polvo cósmico que absorbe la luz, lo que distorsiona la luminosidad aparente), pero condujo a un cambio fundamental en nuestra comprensión del universo. En 1920, la Academia Nacional de

Edwin Hubbleutiliza el telescopio Hooker de 100 pulgadas (2,5 metros) en el Observatorio Mount Wilson, California. En 1924, Hubble anunció que lo había utilizado para ver más allá de la Vía Láctea.

una imagen tomadadel Telescopio Espacial Hubble muestra RS Puppis, una variable cefeida con un fenómeno conocido como eco de luz, cuando la luz de la estrella se refleja en una nube de polvo cósmico.

Las ciencias en los EE.UU. celebraron un debate sobre la naturaleza y la extensión del universo. Los astrónomos estadounidenses Heber Curtis y Harlow Shapley argumentaron a favor y en contra de la existencia de otras galaxias en lo que se conoció como "el Gran Debate" o el "Debate Shapley-Curtis". Shapley afirmó que la Vía Láctea era una sola galaxia y que las "nebulosas espirales" (concentraciones de estrellas en forma de espiral) como Andrómeda eran nubes de gas dentro de nuestra propia galaxia, que creía que era mucho más grande de lo que pensaba la mayoría de los astrónomos. Sostuvo que si Andrómeda fuera una galaxia separada, su distancia de la Tierra sería demasiado grande para ser aceptable. También sostuvo que el sol no estaba en el centro de la Vía Láctea, sino en los bordes exteriores de la Vía Láctea.

Curtis argumentó que las nebulosas espirales eran galaxias separadas. Uno de sus argumentos fue que las estrellas en explosión (conocidas como novas) en estas nebulosas se parecían a las de nuestra propia galaxia, y había un número mucho mayor en algunos lugares, como

Andrómeda—que en otros. Esto sugería que existían más estrellas e insinuaba la presencia de galaxias separadas, a las que llamó "universos islas". Al mismo tiempo, Curtis colocó el sol en el centro de nuestra propia galaxia.

El Gran Debate es un testimonio de cuán incompleta era nuestra comprensión del universo hace apenas 100 años, al igual que la teoría incorrecta de Curtis sobre la posición del sol en la Vía Láctea. (La teoría de Shapley de que el Sol está en los bordes exteriores de la Vía Láctea está cerca de ser correcta).

Avance del Hubble

En 1924, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble resolvió el debate Shapley-Curtis tomando algunas medidas utilizando variables cefeidas. Durante el debate, Shapley había conjeturado que la Vía Láctea tenía unos 300.000 años luz de diámetro, diez veces más que los 30.000 años luz estimados por Curtis. Hubble, utilizando variables cefeidas que había localizado en Andrómeda, calculó que Andrómeda estaba a 900.000 años luz de distancia (ahora revisado a 2,5 millones de años luz), mucho más allá de Curtis.

> Por la muerte de la señorita Leavitt
> El 12 de diciembre de 1921,
> el observatorio perdió un
> investigador de la
> valor más alto.
> **Harlow Shapley**

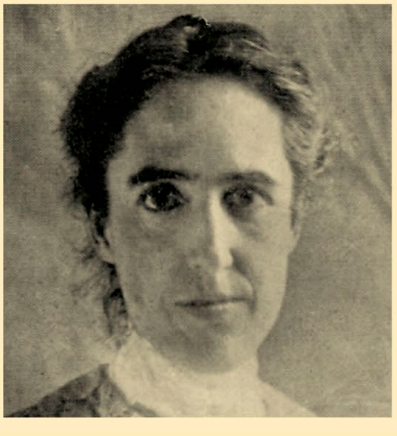
y las estimaciones de Shapley sobre el tamaño percibido de la Vía Láctea. Por tanto, Curtis tenía razón. Los cálculos de Hubble demostraron que no sólo la Vía Láctea era mucho más grande de lo que se pensaba, sino que Andrómeda no era una nebulosa en absoluto, sino otra galaxia: la galaxia de Andrómeda. Fue el primer descubrimiento de una galaxia conocida fuera de la nuestra.

Expansión y colisión

El descubrimiento de Hubble, posible gracias al trabajo de Leavitt, condujo en última instancia al conocimiento de que la Vía Láctea es sólo una de muchas galaxias, cada una de las cuales contiene de millones a cientos de miles de millones de estrellas. Actualmente se estima que hay alrededor de dos billones de galaxias en el universo, y que la primera se creó apenas unos cientos de millones de años después del Big Bang, ocurrido hace 13.800 millones de años. Se cree que la edad de nuestra Vía Láctea es casi igual de antigua, alrededor de 13.600 millones de años.

En 1929, Hubble también descubrió que el universo parecía estar expandiéndose y que casi todas las galaxias se alejaban unas de otras, con velocidad creciente a medida que las distancias se hacían mayores. Una excepción notable es Andrómeda, que ahora se sabe que se mueve en curso de colisión hacia nuestra galaxia, a una velocidad de 110 kilómetros por segundo. Esto es relativamente lento en comparación con su distancia, pero significa que dentro de unos 4.500 millones de años, la Vía Láctea y Andrómeda chocarán y formarán una sola galaxia, que los astrofísicos han apodado Milkomeda. Sin embargo, este evento no será demasiado dramático: aunque las dos galaxias se fusionarán, es poco probable que dos estrellas colisionen.

Henrietta Swan Leavitt



Nacida en Lancaster, Massachusetts, en 1868, Leavitt estudió en Oberlin College, Ohio, antes de asistir a la Sociedad para la Instrucción Colegiada de Mujeres (ahora llamada Radcliffe College) en Cambridge, Massachusetts. Desarrolló un interés por la astronomía después de tomar un curso sobre el tema. Por la misma época, una enfermedad le provocó una pérdida de audición, que fue empeorando a lo largo de su vida.

Después de graduarse en 1892, Leavitt trabajó en el Observatorio de Harvard, entonces dirigido por el astrónomo estadounidense Edward Charles Pickering. Ella se unió a un grupo de mujeres conocido como las "computadoras de Harvard" cuya función era estudiar placas fotográficas de estrellas. Al principio no le pagaban, pero luego ganó 30 centavos la hora. Como parte de su trabajo, encontró 2.400 estrellas variables y, al hacerlo, descubrió las cefeidas variables. Leavitt murió de cáncer en 1921.

Trabajos clave

1908 *1777 variables en las Nubes de Magallanes*
1912 *Períodos de 25 estrellas variables en la Pequeña Nube de Magallanes*

EL FUTURO DEL UNIVERSO

EL UNIVERSO ESTÁTICO O EN EXPANSIÓN

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Alejandro Friedmann
(1888-1925)

ANTES
1917 Albert Einstein introduce la constante cosmológica para sugerir que el universo es estático.

DESPUÉS
1929 El astrónomo estadounidense Edwin Hubble demuestra que el universo se está expandiendo: descubre que las galaxias distantes se mueven más rápidamente que las más cercanas a nosotros.

1931 Einstein acepta La teoría de un universo en expansión.

1998 Los científicos de dos proyectos independientes descubren que la expansión del universo se está acelerando.

2013 Se calcula que la energía oscura constituye el 68 por ciento del universo y está estrechamente vinculada a la constante cosmológica.

Wgallina Albert Einstein ideó su teoría de la relatividad general en 1915, había un problema. Estaba convencido de que el universo era estático y eterno, pero según sus cálculos, esto debería significar que el universo eventualmente colapsaría sobre sí mismo debido a la gravedad. Para solucionar este problema, Einstein propuso la idea de una constante cosmológica, representada por la letra griega lambda (l).Esta era una medida de la "energía del vacío" en el espacio.

La teoría general de la relatividad de Einstein estableció un conjunto de "ecuaciones de campo" que mostraban cómo se relacionaba la curvatura del espacio-tiempo.

a la masa y energía que se mueven a través de él. Pero cuando aplicó estas ecuaciones al universo, descubrió que debería expandirse o contraerse, y creía que ninguna de las dos cosas podía ser cierta.

En cambio, Einstein creía que el universo era eterno y añadió su "miembro cosmológico" (ahora conocido como constante cosmológica). Esto permitió un universo que podría superar los efectos de la gravedad y, en lugar de colapsar sobre sí mismo, permanecería estático.

En 1922, el matemático ruso Alexander Friedmann llegó a una conclusión diferente. Demostró que el universo era homogéneo:

Hay tres futuros posibles para el universo.

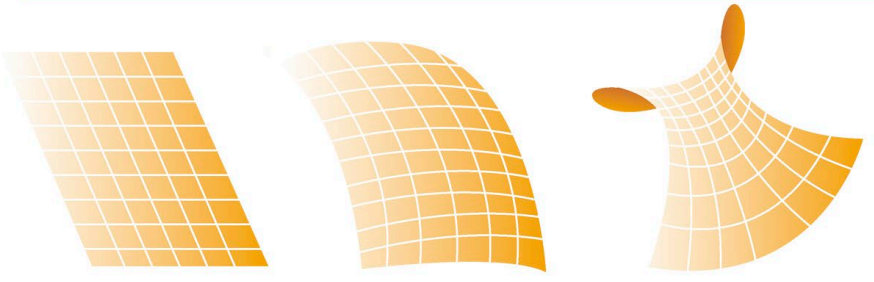
El universo es **estático**-va a **detener en expansión**y voluntad **nunca contrato**.

El universo es **cerrado**y finalmente será **colapsar sobre sí mismo**.

El universo es **abierto y continuará en expansión para siempre**-esto es La teoría actual.

Ver también: De la relatividad clásica a la relatividad especial 274 · Curvar el espacio-tiempo 280 · Masa y energía 284–285 · El Big Bang 296–301 · Energía oscura 306–307

La forma del universo.



Si la densidad del universoes exactamente
Al igual que un valor crítico, es "plano". En un universo plano, las líneas paralelas nunca se encuentran. La analogía bidimensional de este modelo es un plano (una superficie plana).

Si el universo es más denso que un valor crítico, está curvado positivamente o "cerrado" y es finito en masa y extensión. La analogía 2-D es una superficie esférica donde convergen líneas paralelas.

Si el universo es menos densoque un valor crítico, es curvado negativamente o "abierto" y por lo tanto infinito. La analogía 2-D es una superficie en forma de silla de montar donde
las rectas paralelas divergen.

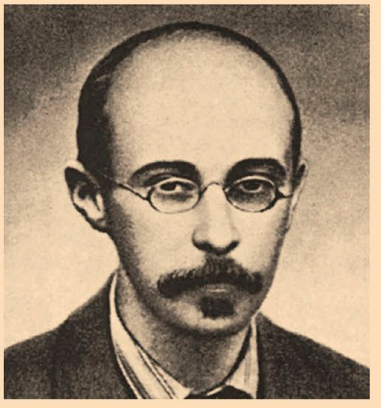
era idéntico en cualquier lugar del universo en el que estuvieras y en cualquier dirección que miraras, por lo que el universo no podía ser estático. Todas las galaxias se estaban alejando unas de otras, pero dependiendo de en qué galaxia te encontraras, todas las demás galaxias también se alejarían de ti. Por lo tanto, podrías pensar que estás en el centro del universo, pero cualquier otro observador en otra galaxia creería que lo mismo ocurre con su posición.

Modelos para el universo.

Como resultado de su trabajo, Friedmann ideó tres modelos para el universo, que varían según el valor de la constante cosmológica. Un modelo era que la gravedad haría que la expansión se desacelerara, revirtiéndose en última instancia y terminando en un "Big Crunch". La segunda era que el universo eventualmente se volvería estático una vez que se detuviera la expansión. Un tercer modelo era que la expansión continuaría para siempre a un ritmo cada vez más rápido.

Aunque Einstein inicialmente se burló de las ideas de Friedmann en 1923, al año siguiente las había aceptado. Sin embargo, no sería hasta 1931 antes de que aceptara verdaderamente que el universo se estaba expandiendo, dos años después de que el astrónomo estadounidense Edwin Hubble presentara evidencia de que el universo efectivamente se estaba expandiendo. Hubble había notado la luz alargada (o corrimiento al rojo) de galaxias distantes, que podría usarse para medir la distancia de objetos lejanos. Descubrió que las galaxias más distantes se movían más rápido que las más cercanas, prueba de que el universo mismo se estaba expandiendo.

Tras el descubrimiento de Hubble, la idea de una constante cosmológica se consideró un error por parte de Einstein. Sin embargo, en 1998, los científicos descubrieron que el universo se estaba expandiendo a un ritmo acelerado. La constante cosmológica sería crucial para comprender la energía oscura y conduciría a la reintroducción del término.



Alejandro Friedmann

Alexander Friedmann nació en San Petersburgo, Rusia, en 1888. Su padre era bailarín de ballet y su madre pianista. En 1906, Friedmann fue admitido en el
Universidad Estatal de San Petersburgo para estudiar matemáticas. Aquí también se dedicó al estudio de la teoría cuántica y la relatividad y obtuvo su maestría en matemáticas puras y aplicadas en 1914.

En 1920, después de servir como aviador e instructor en la Primera Guerra Mundial, Friedmann comenzó Investigación basada en la teoría general de la relatividad de Einstein. Usó las ecuaciones de campo de Einstein para desarrollar su propia idea de un universo dinámico, contrarrestando la creencia de Einstein de que el
El universo era estático. En 1925, Friedmann fue nombrado director del Observatorio Geofísico Principal de Leningrado, pero murió ese mismo año, a la edad de 37 años, de fiebre tifoidea.

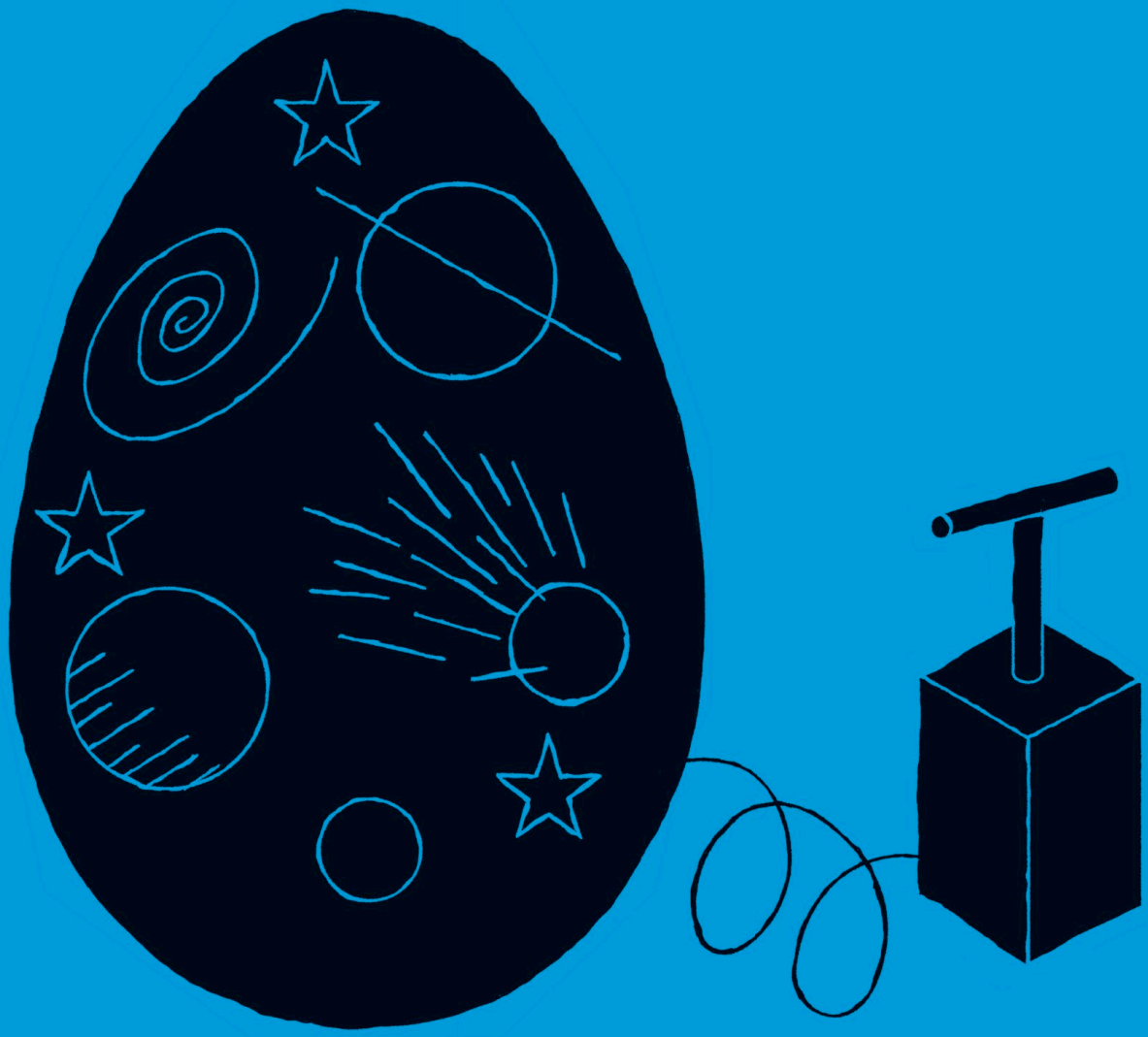
Trabajos clave

1922"Sobre la curvatura del espacio"
1924"Sobre la posibilidad de un mundo con curvatura negativa constante del espacio"

EL HUEVO CÓSMICO,

EXPLOTANDO EN EL MOMENTO DE CREACIÓN

EL BIG BANG



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Georges Lemaître
(1894-1966)

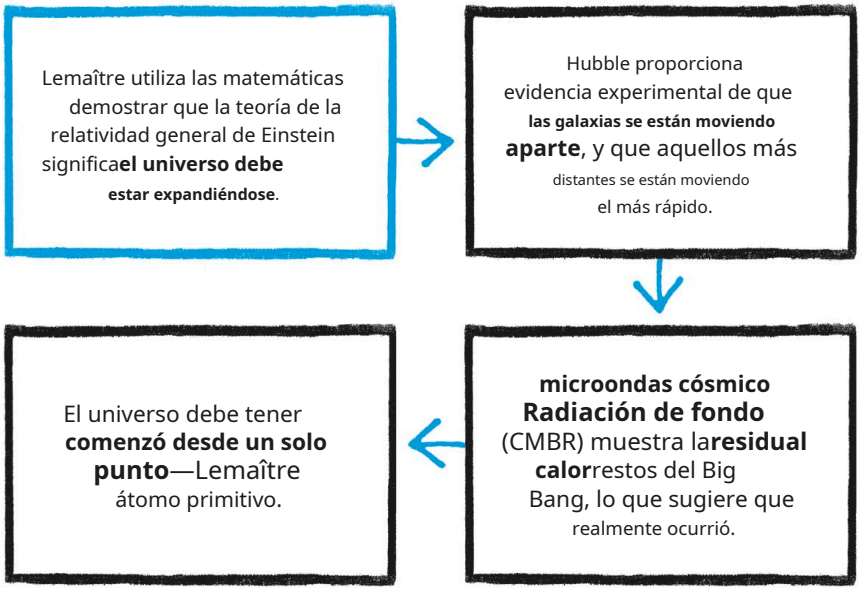
ANTES
1610 Juan Kepler
Supone que el universo es finito, porque el cielo nocturno es oscuro y no está iluminado por un número infinito de estrellas.

1687 Las leyes del movimiento de Isaac Newton explican cómo se mueven las cosas en el universo.

1929 Edwin Hubble descubre que todas las galaxias se están alejando unas de otras.

DESPUÉS
1998 Destacados astrónomos anuncian que la expansión del universo se está acelerando.

2003 La sonda WMAP de la NASA encuentra evidencia de "inflación", o el estallido de expansión justo después del Big Bang, al mapear pequeñas fluctuaciones de temperatura en el cielo.



Durante más de dos milenios, las mentes más brillantes de la humanidad han reflexionado sobre los orígenes de el universo y nuestro lugar dentro de él. Durante siglos, muchos creyeron que algún tipo de deidad creó el universo, y que la Tierra estaba en su centro, con todas las estrellas viajando a su alrededor. Pocos sospechaban que la Tierra ni siquiera era el centro de su propio sistema solar, que a su vez orbita una de los cientos de miles de millones de estrellas del planeta.

universo. La teoría actual sobre los orígenes del cosmos data de principios de la década de 1930, cuando el astrónomo belga Georges Lemaître sugirió por primera vez lo que ahora se conoce como el Big Bang.

El huevo cósmico de Lemaître

En 1927, Lemaître había propuesto que el universo se estaba expandiendo; cuatro años más tarde desarrolló la idea, explicando que la expansión había

Georges Lemaître

Nacido en 1894 en Charleroi, Bélgica, Georges Lemaître sirvió en la Primera Guerra Mundial como oficial de artillería, luego ingresó en un seminario y fue ordenado sacerdote en 1923. Estudió en el Reino Unido en el laboratorio de física solar de la Universidad de Cambridge durante un año. y en 1924 se incorporó al Instituto Tecnológico de Massachusetts en Estados Unidos. En 1928, era profesor de astrofísica en la Universidad Católica de Lovaina, en Bélgica.

Lemaître estaba familiarizado con los trabajos de Edwin Hubble y otros que discutieron un universo en expansión y publicaron trabajos.

desarrollando esta idea en 1927. La teoría de 1931 por la que Lemaître es más conocido (la idea de que el universo se había expandido desde un solo punto) fue inicialmente descartada, pero finalmente se demostró que era correcta poco antes de su muerte en 1966.

Trabajos clave

1927"Discusión sobre la evolución del universo"
1931"La hipótesis del átomo primitivo"

Traducido del inglés al español - www.onlinedoctranslator.com

Ver también: El efecto Doppler y el corrimiento al rojo 188–191 · Ver más allá de la luz 202–203 Antimateria 246 · Aceleradores de partículas 252–255 · Asimetría materia-antimateria 264 El universo estático o en expansión 294–295 · Energía oscura 306–307

comenzó hace una cantidad finita de tiempo en un solo punto de lo que llamó el "átomo primitivo" o "huevo cósmico". Lemaître, un sacerdote, no creía que esta idea estuviera reñida con su fe; declaró un interés igual en buscar la verdad desde el punto de vista de la religión y desde el de la certeza científica. Había derivado en parte su teoría de un universo en expansión de la teoría de la relatividad general de Einstein, pero Einstein descartó la idea de expansión o contracción por falta de evidencia de movimiento a gran escala. Anteriormente había añadido un término llamado "constante cosmológica" a sus ecuaciones de campo de la relatividad general para garantizar que permitieran un universo estático.

Sin embargo, en 1929, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble hizo un descubrimiento que apoyaba la idea de un universo en expansión. Al observar el cambio en la luz a medida que los objetos se alejan de la Tierra, conocido como corrimiento al rojo, el Hubble pudo calcular qué tan rápido se aleja una galaxia y, por lo tanto, su distancia. Todas las galaxias parecían alejarse de la Tierra, siendo las más alejadas las que se movían más rápido. Lemaître, al parecer, estaba en el camino correcto.

El modelo de estado estacionario

A pesar de estas pruebas, Hubble y Lemaître todavía se enfrentaban a una dura competencia por parte de los sistemas de estado estacionario.

> Me pareció que había dos caminos para verdad, y decidí seguirlos a ambos.
> **Georges Lemaître**

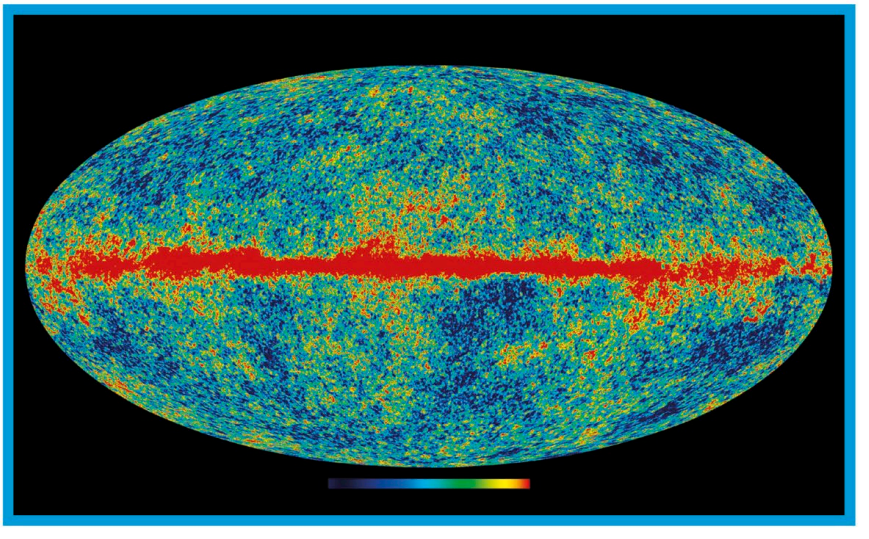
teoría. En este modelo, el universo siempre había existido. La materia se formaba continuamente en el espacio entre otras galaxias a medida que se alejaban, y la creación continua de materia y energía (a un ritmo de una partícula de hidrógeno por metro cúbico cada 300.000 años) mantenía el universo en equilibrio. El
El hidrógeno formaría estrellas y, por tanto, daría lugar a elementos más pesados, y luego a planetas, más estrellas y galaxias. La idea fue defendida por el astrónomo británico Fred Hoyle.

quien, en la radio en 1949, se burló de la teoría opuesta de Hubble y Lemaître calificándola de un "big bang". El pegadizo nombre se quedó para describir las ideas ampliamente aceptadas en la actualidad.

Calor residual

Un año antes, el físico ucraniano George Gamow y el cosmólogo estadounidense Ralph Alpher habían publicado "El origen de los elementos químicos" para explicar las condiciones inmediatamente después de la explosión de un átomo primitivo y la distribución de partículas en el universo. El artículo predijo con precisión la radiación cósmica de fondo de microondas (CMBR), el calor residual que quedó del Big Bang.
En 1964, las ideas recibieron un gran impulso cuando Arno Penzias y Robert Wilson detectaron CMBR por casualidad mientras intentaban utilizar una antena grande para realizar radioastronomía.

La presencia de CMBR en el universo prácticamente descartó la teoría del estado estacionario. Apuntó a un período mucho más caliente en la historia del universo, donde la materia se estaba acumulando para formar-



La mejor prueba del Big Bang es la radiación cósmica de fondo de microondas (CMBR), vista aquí en una imagen de todo el cielo de las fluctuaciones diminutas en la temperatura de CMBR, tomada por el satélite WMAP de la NASA entre 2003 y 2006. Las variaciones del azul oscuro (frío) al rojo (caliente) Corresponden a cambios de densidad en el universo primitivo.

galaxias, lo que sugiere que el universo no siempre había sido el mismo. Su evidente expansión y el hecho de que las galaxias alguna vez estuvieron mucho más juntas plantearon un problema para los teóricos del estado estacionario, que creían que la densidad de la materia en el universo es constante e invariable a lo largo de la distancia y el tiempo. Posteriormente hubo intentos de reconciliar la teoría del estado estacionario con CMBR y otros descubrimientos, pero fueron en vano. La teoría del Big Bang es ahora la explicación más importante de cómo comenzó nuestro universo.

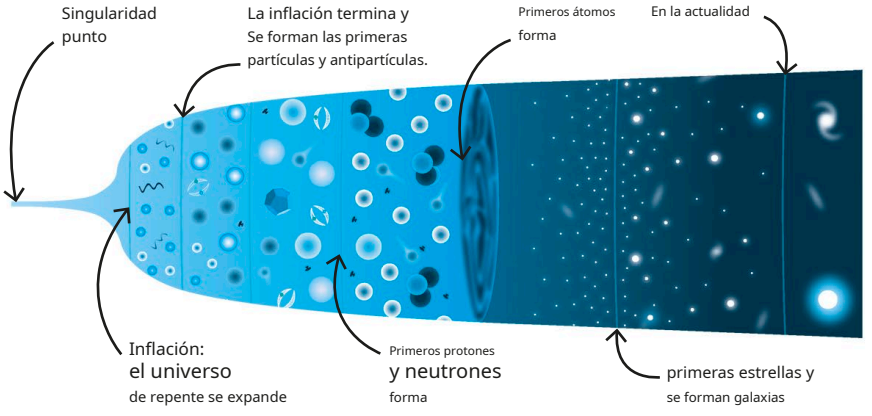
El universo en la infancia

Encontrar CMBR resultó crucial porque ayudó a desarrollar una imagen de cómo probablemente evolucionó el universo, aunque la teoría del Big Bang no puede describir el momento exacto de su creación hace 13.800 millones de años ni lo que vino antes (si es que hubo algo).

El físico estadounidense Alan Guth estuvo entre los cosmólogos que desarrollaron la teoría del Big Bang en las últimas partes del siglo XX. En 1980, propuso que la "inflación" cósmica ocurría en una pequeña fracción de segundo (10^{-35} segundos, aproximadamente una billonésima de billonésima de billonésima de segundo) en la vida del universo. Desde su punto de "singularidad" inicial, infinitamente caliente y denso, el universo comenzó

> El Big Bang no fue una explosión *en* espacio; fue mas como una explosión *de* espacio.
>
> **Tamara Davis**
>
> **astrofísico australiano**

Teoria del Big Bang sostiene que el universo evolucionó a partir de una "singularidad" primordial infinitamente densa y caliente (el "átomo primitivo" de Lemaître), que se expandió rápidamente, emitiendo grandes cantidades de calor y radiación.



expandirse más rápido que la velocidad de la luz. La teoría de Guth, aunque aún no ha sido probada, ayuda a explicar por qué el universo se enfrió y también por qué parece ser uniforme, con la materia y la energía uniformemente distribuidas.

Inmediatamente después del Big Bang, los físicos creen que el universo era energía pura y que las cuatro fuerzas fundamentales (la gravedad, la fuerza electromagnética, la fuerza fuerte y la interacción débil) se unificaron. La gravedad se separó y la materia y la energía quedaron en un estado intercambiable de "masa-energía". Al comienzo de la inflación, la fuerza nuclear fuerte se separó y se formó una enorme cantidad de masa-energía. Los fotones (partículas de luz preparadas con energía electromagnética) dominaban el universo. Hacia el final de la inflación, todavía una billonésima de segundo después del Big Bang, surgió un plasma caliente de quarks y gluones, un mar de partículas y antipartículas que continuamente intercambiaban masa por energía en

colisiones de materia y antimateria. Por razones aún desconocidas, este proceso creó más materia que antimateria y la materia se convirtió en el componente principal del universo.

Aún fracciones de segundo después del Big Bang, la fuerza electromagnética y la interacción débil se separaron y el universo se enfrió lo suficiente como para que los quarks y gluones se unieran para formar partículas compuestas: protones, neutrones, antiprotones y antineutrones. En tres minutos, las colisiones de protonneutrones produjeron los primeros núcleos atómicos, algunos de los cuales se fusionaron en helio y litio. En estas reacciones se absorbieron neutrones, pero quedaron muchos protones libres.

Opaco a transparente

El universo primitivo era opaco y permaneció así durante unos cientos de miles de años. Los núcleos de hidrógeno constituían casi las tres cuartas partes de su masa; el resto eran núcleos de helio con trazas de núcleos de litio y deuterio. Unos 380.000 años después del Big Bang, el

El universo se había enfriado y expandido lo suficiente como para que los núcleos capturaran electrones libres y formaran los primeros.

átomos de hidrógeno, helio, deuterio y litio. Liberados de su interacción con electrones y núcleos libres, los fotones podrían moverse libremente a través del espacio como radiación, y la

El universo abandonó sus edades oscuras y se volvió transparente. CMBR es la luz residual de este período.

Las estrellas y las galaxias evolucionan

Los astrónomos creen ahora que las primeras estrellas se formaron cientos de millones de años después del Big Bang. A medida que el universo se volvió transparente, se formaron densos grupos de gas hidrógeno neutro que crecieron bajo la fuerza de la gravedad a medida que se extraía más materia de áreas de menor densidad. Cuando las acumulaciones de gas alcanzaron una temperatura lo suficientemente alta como para que se produjera la fusión nuclear, aparecieron las primeras estrellas.

Los físicos que modelaron estas estrellas creen que eran tan enormes, calientes y luminosas (entre 30 y 300 veces más grandes que el Sol y millones de veces más brillantes) que provocaron cambios fundamentales en el universo. Su luz ultravioleta reionizó los átomos de hidrógeno nuevamente en electrones y protones, y cuando estas estrellas de vida relativamente corta explotaron en supernovas, después de alrededor de un millón de años, crearon nuevos elementos más pesados, como el uranio y el oro. Aproximadamente mil millones de años después del Big Bang,

La galaxia más lejana conocida, visto por el telescopio espacial Hubble, probablemente se formó unos 400 millones de años después del Big Bang. Aquí se muestra tal como era hace 13.400 millones de años.

> No fue hasta que agotamos todas las explicaciones posibles para el origen del sonido que nos dimos cuenta que habíamos tropezado sobre algo grande.
> **Arno Penzias**

la siguiente generación de estrellas, que contenían elementos más pesados y tenían vidas más largas, se agruparon debido a la gravedad, formando las primeras galaxias. Estas galaxias comenzaron a crecer y evolucionar, algunas chocando entre sí para crear más y más estrellas dentro de ellas de todas las formas y tamaños. Luego, las galaxias se alejaron aún más a medida que el universo se expandió durante los siguientes miles de millones de años. Hubo menos colisiones y el universo se volvió relativamente más estable, como lo es hoy. Lleno de billones de galaxias y abarcando miles de millones de años luz, todavía se está expandiendo. Algunos científicos creen que se expandirá para siempre, hasta que todo se extienda hacia la nada.

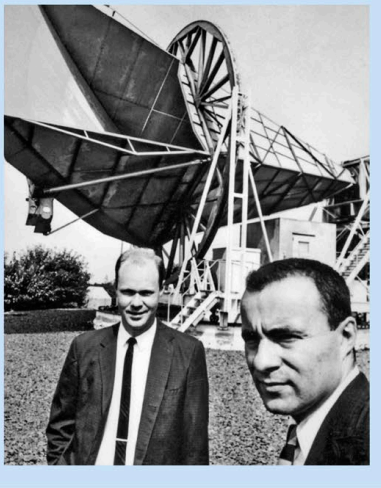
Una línea de tiempo observable

La teoría del Big Bang ha permitido a los científicos comprender con firmeza los orígenes de nuestro universo, proporcionando una línea de tiempo que se remonta a 13.800 millones de años hasta sus primeros momentos. Fundamentalmente, la mayoría de sus predicciones son comprobables. Los físicos pueden recrear las condiciones posteriores al Big Bang, mientras que CMBR ofrece observación directa de una era que comenzó cuando el universo tenía apenas 380.000 años.

microondas cósmico ruido de fondo"

En 1964, los astrónomos estadounidenses Arno Penzias (en la foto de abajo, derecha) y Robert Wilson (izquierda) estaban trabajando en la antena Holmdel Horn en Bell. Laboratorios telefónicos en Nueva Jersey. El gran telescopio con forma de cuerno fue diseñado para captar detecciones de ondas de radio increíblemente sensibles.

Los dos astrónomos buscaban hidrógeno neutro (HI), hidrógeno atómico con un protón y un electrón, abundante en el universo pero raro en la Tierra, pero se vieron obstaculizados por un extraño ruido de fondo. Dondequiera que apuntaran la antena, el universo devolvía el equivalente a la estática de la televisión. Habiendo pensado primero que las aves o un cableado defectuoso podrían ser la causa, consultaron a otros astrónomos. Se dieron cuenta de que estaban captando radiación cósmica de fondo de microondas (CMBR), calor residual del Big Bang, predicho por primera vez en 1948. El trascendental descubrimiento les valió a ambos el Premio Nobel de Física en 1978.



MATERIA VISIBLE SOLO NO ES SUFICIENTE

MATERIA OSCURA

EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES

Fritz Zwicky(1898-1974),
Vera Rubin(1928-2016)

ANTES

siglo 17 La teoría de la gravedad de Isaac Newton lleva a algunos a preguntarse si existen objetos oscuros en el universo.

1919 El astrónomo británico Arthur Eddington demuestra que los objetos masivos pueden deformar el espacio-tiempo y desviar la luz.

1919 Fritz Zwicky, un inconformista astrónomo suizo, afirma adelantan por primera vez la existencia de materia oscura.

DESPUÉS

década de 1980 Los astrónomos identifican más galaxias que se cree que están llenas de materia oscura.

2019 La búsqueda de materia oscura continúa, sin resultados definitivos hasta el momento.

El universo tal como parece ser no tiene sentido. Si observamos toda la materia visible, las galaxias no deberían existir: simplemente no hay suficiente gravedad para mantenerlas a todas juntas. Pero hay billones de galaxias en el universo, entonces, ¿cómo puede ser esto? Esta pregunta ha atormentado a los astrónomos durante décadas, y la solución no es menos desconcertante: la materia que no se puede ver ni detectar, más conocida como materia oscura.

La idea de la materia invisible en el universo se remonta al siglo XVII, cuando el científico inglés Isaac Newton propuso por primera vez su teoría de la gravedad. Los astrónomos de esta época

Ver también: El método científico 20-23 · Leyes de la gravedad 46–51 · Modelos de materia 68–71 · Curvar el espacio-tiempo 280 · Masa y energía 284–285 · Descubriendo otras galaxias 290–293 · Energía oscura 306–307 · Ondas gravitacionales 312–315

> Tiene que haber mucha masa para que las estrellas orbiten tan rápidamente, pero no podemos verla. A esto lo llamamos invisible materia oscura masiva.
>
> **Vera Rubin**

Comenzó a preguntarse si podría haber objetos oscuros en el universo que no reflejaran luz, pero que pudieran ser detectados por sus efectos gravitacionales. Esto dio lugar a la idea de los agujeros negros, y en el siglo XIX se propuso la idea de una nebulosa oscura que absorbía la luz en lugar de reflejarla.

Sin embargo, sería necesario hasta el siglo siguiente para que se produjera un cambio mayor en la comprensión de cómo funcionaban las cosas. A medida que los astrónomos comenzaron a estudiar más y más galaxias, comenzaron a tener más y más preguntas sobre cómo las galaxias pudieron existir en primer lugar. Desde entonces, ha continuado la búsqueda de misteriosas materia y energía oscuras (energía invisible que impulsa la expansión del universo), y hoy los astrónomos se están acercando.

universo invisible

La teoría general de la relatividad de Albert Einstein fue clave para comprender la gravedad y, en última instancia, la materia oscura. Sugirió que la luz misma podría ser desviada por la masa gravitacional de objetos grandes, y que dichos objetos en realidad deforman el espacio-tiempo.

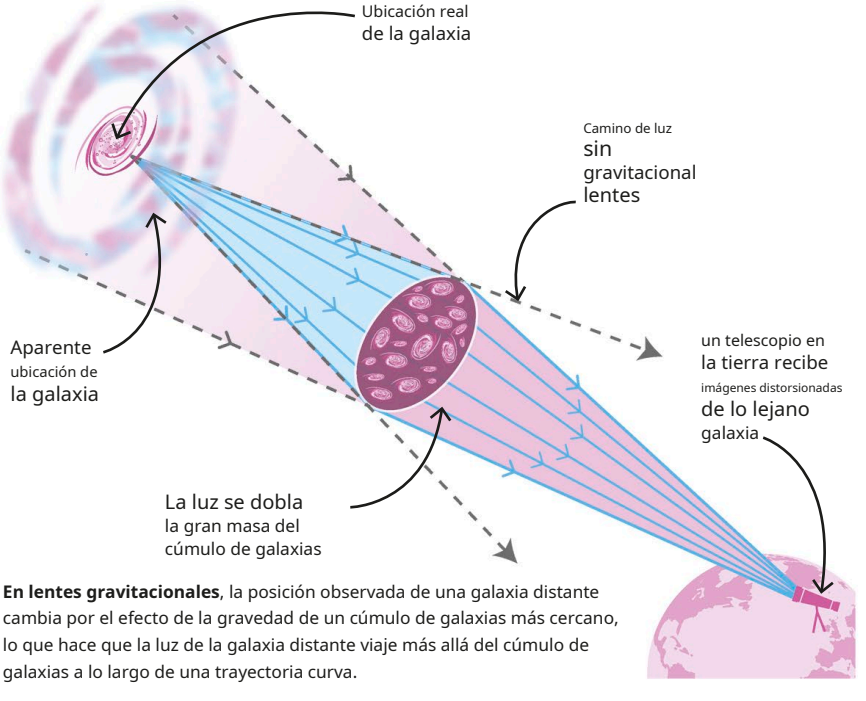
En 1919, Arthur Eddington se propuso demostrar la teoría de Einstein. Había medido las posiciones de las estrellas a principios de ese año, antes de viajar a la isla de Príncipe, frente a la costa occidental de África, para ver las mismas estrellas durante un eclipse. Pudo descubrir que las posiciones de las estrellas habían cambiado ligeramente a medida que su luz se desviaba alrededor de la gran masa del sol, un efecto que ahora se conoce como lente gravitacional.

Más de una década después, en 1933, Fritz Zwicky hizo un descubrimiento sorprendente. Mientras estudiaba un cúmulo de galaxias llamado Cúmulo de Coma, calculó que la masa de las galaxias en el cúmulo debe ser mucho mayor que la materia observable en forma de estrellas para mantener el cúmulo unido. Esto lo llevó a razonar que había materia invisible, o *material de mate*("materia oscura"), que mantiene unido el cúmulo.

Otros astrónomos empezaron a aplicar los mismos métodos a otras galaxias y cúmulos, y llegaron a la misma conclusión. Simplemente no había suficiente materia para mantener todo unido, por lo que o las leyes de la gravedad estaban equivocadas o estaba sucediendo algo que simplemente no podían ver. No podría ser algo así como una nebulosa oscura, que se puede ver por la luz que absorbe. Más bien, tenía que ser algo completamente distinto.

giro galáctico

La astrónoma estadounidense Vera Rubin pudo arrojar luz sobre el problema. A finales de la década de 1970, mientras trabajaba en la Institución Carnegie de Washington, ella y su colega estadounidense Kent Ford quedaron desconcertados al descubrir que la galaxia de Andrómeda no giraba como debería. De-



En lentes gravitacionales, la posición observada de una galaxia distante cambia por el efecto de la gravedad de un cúmulo de galaxias más cercano, lo que hace que la luz de la galaxia distante viaje más allá del cúmulo de galaxias a lo largo de una trayectoria curva.

> En una galaxia espiral, la proporción entre materia oscura y clara es aproximadamente un factor de diez. Probablemente sea un buen número para la proporción entre nuestra ignorancia y conocimiento.
>
> **Vera Rubin**

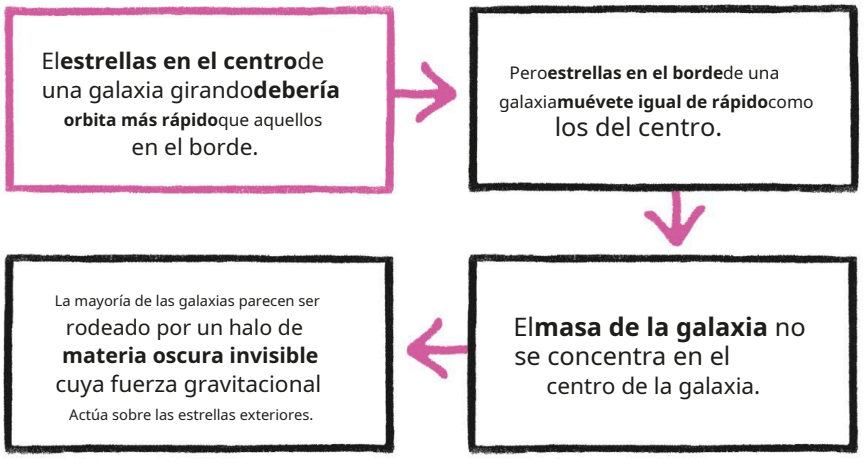
En sus observaciones, descubrieron que los bordes de la galaxia se movían a la misma velocidad que el centro de la galaxia. Imagine a una patinadora sobre hielo girando con los brazos extendidos; sus manos se mueven más rápido que su cuerpo. Si la patinadora sobre hielo luego junta los brazos, gira más rápido a medida que su masa se mueve hacia su centro. Pero este no fue el caso de la galaxia de Andrómeda.

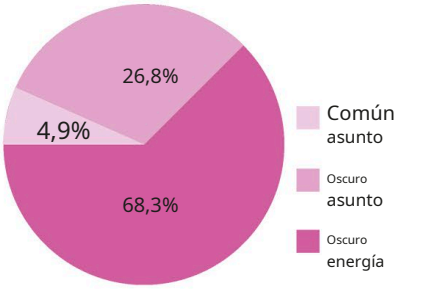
Al principio los dos astrónomos no se dieron cuenta de las implicaciones de lo que estaban viendo. Poco a poco, sin embargo, Rubin empezó a descubrir que la masa de la galaxia no estaba concentrado en su centro, sino que se extendía por toda la galaxia. Esto explicaría por qué la velocidad orbital era similar en toda la galaxia, y la mejor manera de explicar esta observación era si hubiera un halo de materia oscura rodeando la galaxia y manteniéndola unida. Rubin y Ford habían encontrado, indirectamente, la primera evidencia de un universo invisible.

Al escondite

Tras el descubrimiento de Rubin y Ford, los astrónomos empezaron a apreciar la escala de lo que estaban presenciando. En la década de 1980, basándose en el trabajo de Eddington que demostraba que grandes masas podían doblar el espacio-tiempo, se detectaron muchos casos de lentes gravitacionales causados por la materia oscura. A partir de estos, los astrónomos calcularon que un vasto 85 por ciento de la masa del Universo era materia oscura.

En la década de 1990, los astrónomos notaron algo inusual en la expansión del universo: se estaba acelerando. La gravedad, tal como la entendían, debería haber significado que la expansión en algún momento se ralentizaría. Para explicar esta observación, a los astrónomos se les ocurrió algo llamado "oscuro".





materia visible(los átomos que forman las estrellas y los planetas) representan una pequeña proporción del universo. La mayor parte de la densidad de energía del universo está compuesta de materia oscura invisible y energía oscura.

energía", que constituye alrededor del 68 por ciento del contenido de masa-energía del universo.

Juntas, la materia oscura y la energía oscura constituyen el 95 por ciento del universo conocido, y la materia visible (las cosas que se pueden ver) representa solo el 5 por ciento. Con tanta materia y energía oscuras presentes, debería ser fácil de encontrar. Sin embargo, se les llama "oscuros" por una razón: aún no se ha encontrado evidencia directa que confirme que exista materia o energía oscura.

Los astrónomos están bastante seguros de que la materia oscura es algún tipo de partícula. Saben que interactúa con la gravedad porque pueden ver su efecto en las galaxias a gran escala. Pero, curiosamente, parece no tener interacciones con la materia normal; si así fuera, sería posible ver estas interacciones teniendo lugar en todas partes. En cambio, los astrónomos creen que la materia oscura pasa directamente a través de la materia ordinaria, lo que la hace increíblemente difícil de detectar.

Sin embargo, eso no ha impedido que los científicos intenten detectar la materia oscura y creen que se están acercando. Una de las partículas candidatas a formar materia oscura se llama partícula masiva que interactúa débilmente.

(WIMP), y aunque estas partículas son increíblemente difíciles de encontrar, teóricamente no es imposible que existan.

El gran desconocido

En su búsqueda de materia oscura, los científicos han intentado construir enormes detectores, llenarlos con líquido y enterrarlos bajo tierra. La idea es que si una partícula de materia oscura pasara a través de uno de estos detectores, como parece que sucede todo el tiempo, dejaría un rastro perceptible. Ejemplos de tales esfuerzos incluyen el Laboratorio Nacional Gran Sasso en Italia y el Experimento de Materia Oscura LZ en Estados Unidos.

Los físicos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, Suiza, también han intentado encontrar materia oscura, buscando cualquier partícula de materia oscura que pueda producirse cuando otras partículas chocan entre sí a velocidades muy altas. Sin embargo, hasta el momento no se ha encontrado ninguna evidencia de este tipo, aunque se espera que futuras actualizaciones del LHC tengan éxito.

Hoy en día, la búsqueda de materia oscura continúa en serio y, aunque los astrónomos están bastante seguros de que existe, aún queda mucho por descubrir. No está claro si la materia oscura es una sola partícula o muchas, ni si experimenta fuerzas como lo hace la materia normal. También puede estar compuesto por una partícula diferente llamada axión, que es mucho más ligera que un WIMP.

En última instancia, todavía queda mucho que aprender sobre la materia oscura, pero claramente ha tenido un impacto importante en la astronomía. Su descubrimiento indirecto ha llevado a los astrónomos a razonar que existe un universo vasto e invisible que simplemente no se puede medir en este momento, y si bien eso puede parecer desalentador, es fascinante también. La esperanza para los próximos años es que finalmente se detecten partículas de materia oscura. Entonces, de manera similar a cómo la detección de ondas gravitacionales ha cambiado la astronomía, los astrónomos podrán sondear la materia oscura y descubrir qué es realmente, y comprender con certeza exactamente qué efecto tiene en el universo. Hasta entonces, todo el mundo está a oscuras.

Mientras mapeaba Al determinar la masa de la galaxia de Andrómeda, Vera Rubin y Kent Ford se dieron cuenta de que la masa estaba esparcida por toda la galaxia y, por tanto, debía mantenerse unida mediante un halo de materia invisible.

Vera Rubin

Vera Rubin nació en Filadelfia, Pensilvania, en 1928. Desarrolló un interés por la astronomía a una edad temprana y se dedicó a las ciencias en la universidad, a pesar de que su maestra de secundaria le dijo que eligiera una carrera diferente. Fue rechazada por la astrofísica de la Universidad de Princeton.

programa de posgrado, ya que no admitía mujeres y, en cambio, se matriculaba en la Universidad de Cornell.

En 1965, Rubin se incorporó a la Carnegie Institution de Washington, donde se decantó por el campo poco controvertido de mapear la masa de las galaxias. Ganó numerosos premios por el descubrimiento de que la masa no se concentra en el centro de una galaxia, lo que sugiere la existencia de materia oscura. La primera mujer a la que se le permitió observar en el Palomar Observatorio, Rubin fue una ardiente defensora de las mujeres en la ciencia. Murió en 2016.

Trabajos clave

1997 *Galaxias brillantes, materia oscura*
2006 "Viendo materia oscura en la galaxia de Andrómeda"

UN DESCONOCIDO INGREDIENTE DOMINA EL UNIVERSO

ENERGÍA OSCURA

EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Saúl Perlmutter(1959–)

ANTES

1917 Albert Einstein propone una constante cosmológica para contrarrestar la gravedad y mantener el universo estático.

1929 Edwin Hubble encuentra pruebas de que el universo se está expandiendo.

1931 Einstein llama a la constante cosmológica su "mayor error".

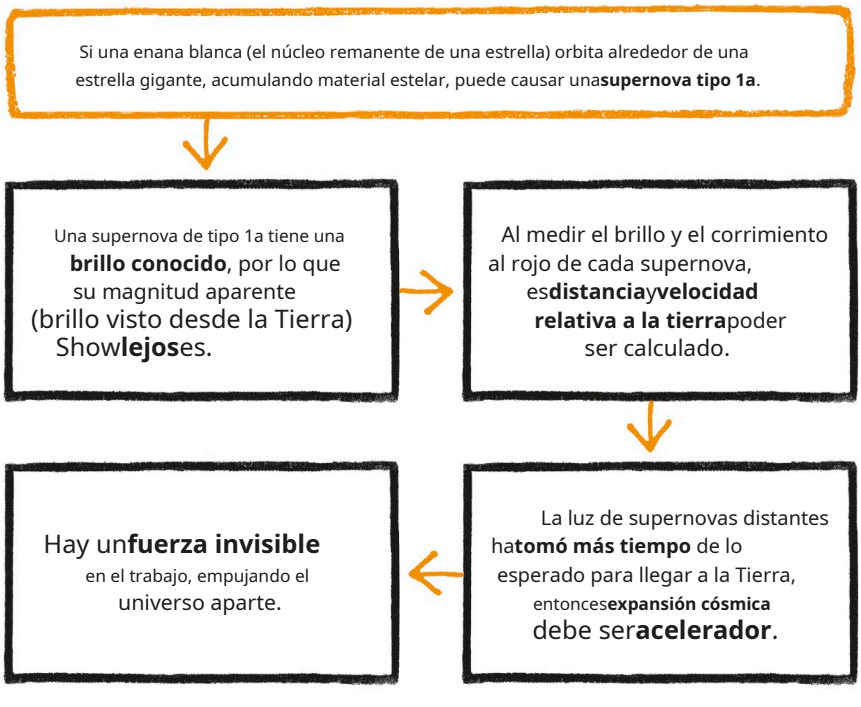
DESPUÉS

2001 Los resultados muestran que la energía oscura probablemente constituye una gran parte del contenido de masa energética del universo.

2011 Los astrónomos encuentran evidencia indirecta de energía oscura en las microondas cósmicas antecedentes (CMB).

2013 Los modelos de energía oscura se han perfeccionado y muestran que es muy similar a la constante cosmológica predicha por Einstein.

Ud. Hasta principios de la década de 1990, nadie estaba realmente seguro de cuál sería el destino del universo. Algunos pensaron que se expandiría para siempre, otros que se volvería estático y otros más que colapsarían sobre sí mismos. Pero en 1998, dos equipos de astrofísicos estadounidenses, uno dirigido por Saul Perlmutter y el otro por Brian Schmidt y Adam Riess—se propuso medir la tasa de expansión del universo. Utilizando potentes telescopios, observaron supernovas de Tipo 1a muy distantes (consulte el diagrama de flujo a continuación). Para su sorpresa, vieron que las supernovas eran más débiles de lo que esperaban, con un tono más rojizo, por lo que debían estar más lejos. Los dos equipos llegaron a la misma conclusión:



Ver también: El efecto Doppler y el corrimiento al rojo 188-191 · De la relatividad clásica a la relatividad especial 274 Masa y energía 284–285 · El universo estático o en expansión 294–295 El Big Bang 296–301 · Materia oscura 302–305 Teoría de cuerdas 308–311

Saúl Perlmutter

Saul Perlmutter nació el 22 de septiembre de 1959 en Illinois y creció cerca de Filadelfia, Pensilvania. Obtuvo una licenciatura en física de la Universidad de Harvard en 1981 y un doctorado en física de la Universidad de California, Berkeley, en 1986. Allí fue nombrado profesor de física en 2004.

A principios de la década de 1990, Perlmutter quedó intrigado por la idea de que las supernovas pudieran usarse como velas estándar (objetos de brillo conocido que pueden usarse para medir distancias en el espacio) para medir la expansión del universo. Tuvo que trabajar duro para ganar tiempo en grandes telescopios, pero sus esfuerzos dieron sus frutos y Perlmutter recibió el Premio Nobel de Física en 2011, junto con Brian Schmidt y Adam Riess.

Trabajos clave

1997 "Descubrimiento de una explosión de supernova a la mitad de la edad del Universo y sus implicaciones cosmológicas"
2002 "La tasa de supernovas distantes de tipo Ia"

las supernovas se movían a un ritmo más rápido de lo que se esperaría si la gravedad fuera la única fuerza que actuara sobre ellas, por lo que la expansión cósmica debe acelerarse con el tiempo.

Fuerza misteriosa

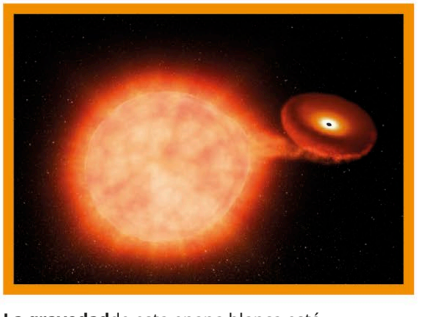
Este descubrimiento iba en contra de la idea de que la gravedad eventualmente debería volver a unir todo. Se hizo evidente que el contenido total de energía del universo debe estar dominado por algo completamente distinto: una fuerza constante e invisible que actúa de manera opuesta a gravedad y aleja la materia. Esta fuerza misteriosa recibió el nombre de "energía oscura". Si existiera tal campo de energía impregnando el universo, Perlmutter, Schmidt y Riess pensaron que podría explicar la expansión.

> Si tienes dudas sobre qué es la energía oscura, estás en buena compañía.
> **Saúl Perlmutter**

A Albert Einstein se le ocurrió un concepto similar en 1917. Su constante cosmológica era un valor que contrarrestaba la gravedad y permitía que el universo permaneciera estático. Pero cuando se demostró que el universo se estaba expandiendo, Einstein declaró que la constante era un error y la eliminó de su teoría de la relatividad.

Hoy en día, todavía se piensa que la energía oscura es la causa más probable de la expansión cósmica, aunque nunca se ha observado directamente. Sin embargo, en 2011, mientras estudiaban los restos del Big Bang (conocido como fondo cósmico de microondas, o CMB), los científicos sugirieron que la falta de estructura a gran escala en el universo insinuaba la existencia de energía oscura, que actuaría contra gravedad para evitar que se formen grandes estructuras de materia.

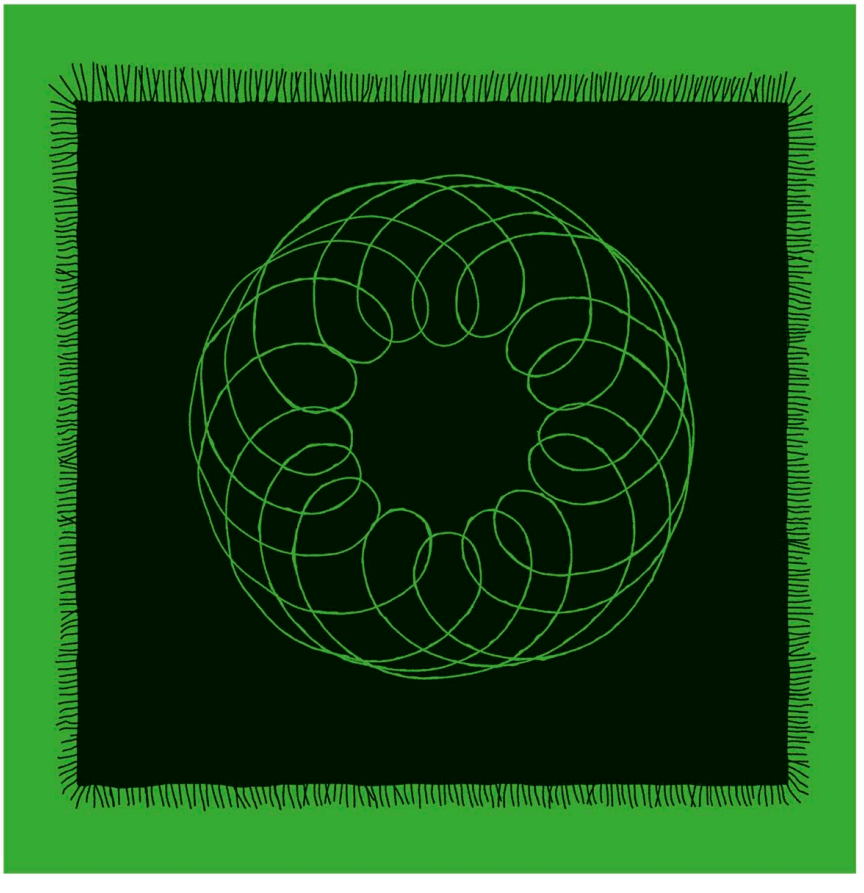
Los astrónomos creen ahora que la energía oscura constituye una gran parte del contenido de masa-energía del universo (alrededor del 68 por ciento), lo que podría tener grandes implicaciones. Es posible que el universo continúe expandiéndose a un ritmo cada vez mayor, hasta que las galaxias se separen más rápido que la velocidad de la luz y, finalmente, desaparezcan de la vista. Las estrellas de cada galaxia podrían hacer lo mismo, seguidas de los planetas y luego la materia, dejando el universo como un vacío oscuro e interminable dentro de billones de años.



La gravedad de esta enana blanca está extrayendo material de una estrella gigante cercana. Cuando su masa haya alcanzado aproximadamente 1,4 veces la masa actual del Sol, se producirá una supernova de tipo 1a.

HILOS EN UN TAPIZ

TEORIA DE LAS CUERDAS



EN CONTEXTO

FIGURA CLAVE
Leonard Susskind(1940–)

ANTES

1914 Se promociona la idea de una quinta dimensión para explicar cómo funciona la gravedad junto con el electromagnetismo.

1926 El físico sueco Oscar Klein desarrolla conceptos de dimensiones más inobservables.

1961 Los científicos idean una teoría para unificar el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil.

DESPUÉS

1975 Abraham Pais y Sam Treiman acuñan el término "modelo estándar".

1995 El físico estadounidense Edward Witten desarrolla Teoría M, que incluye 11 dimensiones.

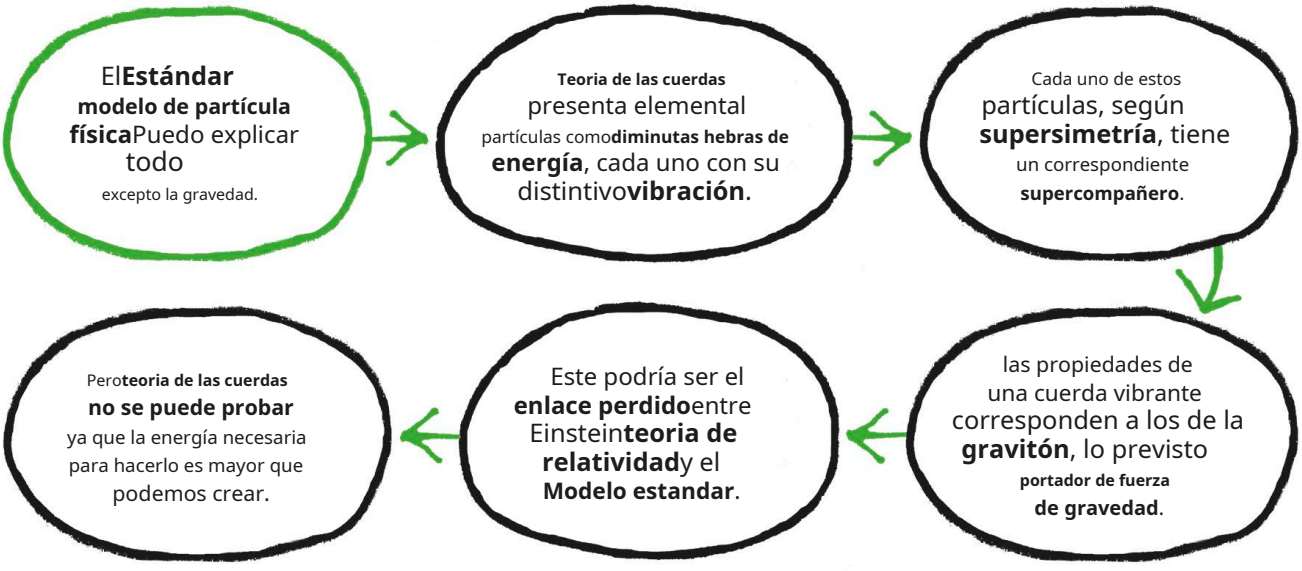
2012 El Gran Colisionador de Hadrones detecta el bosón de Higgs.

PAG

Los físicos del artículo utilizan una [illegible] llamada "modelo estándar" para explicar el universo. Desarrollado en las décadas de 1960 y 1970, este modelo describe las partículas y fuerzas fundamentales de la naturaleza que lo componen todo y mantienen unido el universo.

Sin embargo, un problema con el modelo estándar es que no encaja con la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, que relaciona la gravedad (una de las cuatro fuerzas) con la estructura del espacio y el tiempo, tratándolos como una entidad de cuatro dimensiones llamada "tiempo espacial." El modelo estándar no se puede conciliar con la curvatura del espacio-tiempo según la relatividad general.

Ver también: Leyes de la gravedad 46–51 · Principio de incertidumbre de Heisenberg 220-221 · Entrelazamiento cuántico 222-223 · El zoológico de partículas y quarks 256–257 · Portadores de fuerza 258–259 · El bosón de Higgs 262-263 · El principio de equivalencia 281



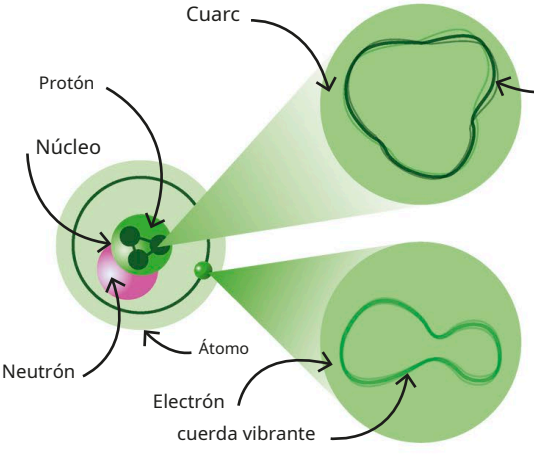
La mecánica cuántica, por otra parte, explica cómo interactúan las partículas en los niveles más pequeños de una escala atómica, pero no puede explicar la gravedad. Los físicos han intentado unir las dos teorías, pero en vano: el problema sigue siendo que el modelo estándar sólo es capaz de explicar tres de las cuatro

fuerzas fundamentales.

Partículas y fuerzas.

En física de partículas, los átomos constan de un núcleo formado por protones y neutrones, rodeado de electrones. El electrón (y los quarks que forman los protones y neutrones) se encuentran entre los 12 fermiones (partículas de materia): partículas elementales o fundamentales que son las más pequeñas conocidas.
bloques de construcción del universo. Los fermiones se subdividen en quarks y leptones. Junto a estos fermiones, hay bosones (partículas portadoras de fuerza) y cuatro fuerzas de la naturaleza: el electromagnetismo, la gravedad, la fuerza fuerte y la fuerza débil. Diferentes bosones son responsables de transportar las diferentes fuerzas entre fermiones. El modelo estándar permite a los físicos describir lo que se conoce como campo de Higgs, un campo de energía que se cree que impregna todo el universo. La interacción de las partículas dentro del campo de Higgs les da su masa, y un bosón mensurable llamado bosón de Higgs es el portador de fuerza del campo de Higgs. Pero ninguno de los Los bosones conocidos son el portador de fuerza de la gravedad, lo que llevó a los científicos a idear una partícula hipotética, aún no detectada, llamada gravitón.

En 1969, en un intento de explicar la fuerza nuclear, que une a los protones y neutrones dentro de los núcleos de los átomos, el físico estadounidense Leonard Susskind desarrolló la idea de la teoría de cuerdas. Casualmente, el físico estadounidense-japonés Yoichiro Nambu y el danés-



Según la teoría de cuerdas, las partículas elementales (como los electrones y los quarks que forman los protones y los neutrones) son cadenas o filamentos de energía. Cada cuerda vibra a una frecuencia diferente y las vibraciones corresponden a la velocidad, el giro y la carga de las partículas.

El físico Holger Nielsen concibió de forma independiente la misma idea al mismo tiempo. Según la teoría de cuerdas, las partículas, los bloques de construcción del universo, no son puntiagudas, sino más bien diminutas hebras de energía unidimensionales y vibrantes, o cuerdas, que dan lugar a todas las fuerzas y a la materia. Cuando las cuerdas chocan, se combinan y vibran juntas brevemente antes de separarse nuevamente.

Sin embargo, los primeros modelos de la teoría de cuerdas eran problemáticos. Explicaron los bosones pero no los fermiones, y requirieron que ciertas partículas hipotéticas, conocidas como taquiones, viajaran más rápido que la luz. También requerían muchas más dimensiones que las conocidas cuatro de espacio y tiempo.

Supersimetría

Para solucionar algunos de estos primeros problemas, los científicos idearon el principio de supersimetría. En esencia, esto sugiere que el universo es simétrico, lo que da a cada una de las partículas conocidas del Modelo Estándar una pareja no detectada, o una "supercompañera", de modo que cada fermión, por ejemplo, está emparejado con un bosón, y viceversa.

> Construir la materia misma a partir de la geometría: eso, en cierto sentido, es lo que hace la teoría de cuerdas.
>
> **David Gross**
> **físico teórico estadounidense**

Cuando el bosón de Higgs, predicho por el físico británico Peter Higgs en 1964, fue finalmente detectado en 2012 por el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, era más ligero de lo esperado. Los físicos de partículas habían pensado que sus interacciones con las partículas del modelo estándar en el campo de Higgs, dándoles su masa, lo harían pesado. Pero ese no fue el caso. La idea de supercompañeros, partículas que potencialmente podrían anular algunos de los efectos del campo de Higgs y producir un bosón de Higgs más ligero, permitió a los científicos abordar este problema. También les permitió

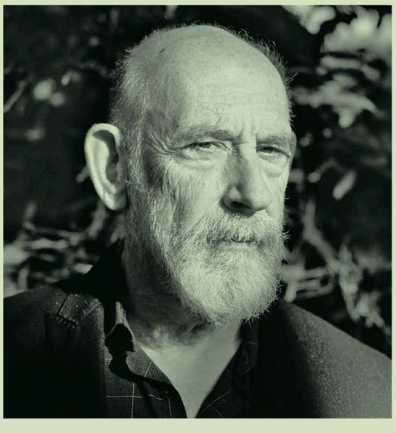
Descubra que tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza, a saber, el electromagnetismo, la fuerza fuerte y la fuerza débil, pueden haber existido con las mismas energías en el Big Bang, un paso clave hacia la unificación de estas fuerzas en una Gran Teoría Unificada.

Juntas, la teoría de cuerdas y la supersimetría dieron lugar a la teoría de supercuerdas, en la que todos los fermiones y bosones y sus supercompañeros son el resultado de cuerdas de energía vibrantes. En la década de 1980, el físico estadounidense John Schwarz y el físico británico Michael Green desarrollaron la idea de que las partículas elementales como los electrones y los quarks son manifestaciones externas de "cuerdas" que vibran en la escala de gravedad cuántica.

De la misma manera que diferentes vibraciones de la cuerda de un violín producen diferentes notas, propiedades como la masa resultan de diferentes vibraciones del mismo tipo de cuerda. Un electrón es un trozo de cuerda que vibra de una determinada manera, mientras que un quark es un trozo de cuerda idéntico que vibra de otra manera.

En el curso de su trabajo, Schwarz y Green se dieron cuenta de que la teoría de cuerdas predecía una partícula sin masa similar a la hipotética

Leonard Susskind

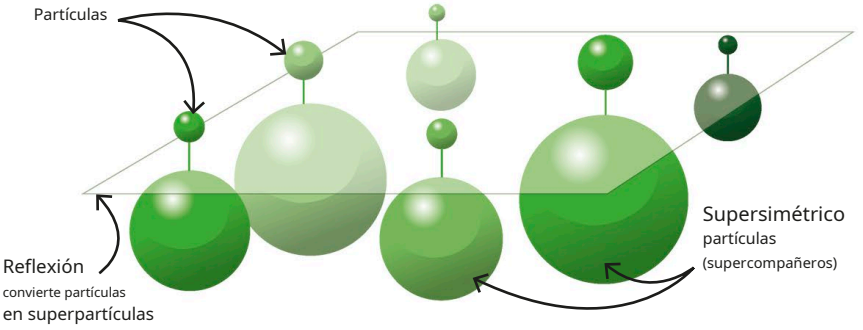


Nacido en la ciudad de Nueva York en 1940, Leonard Susskind es actualmente profesor de Física Felix Bloch en la Universidad de Stanford en California. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Cornell, Nueva York, en 1965, antes de incorporarse a la Universidad de Stanford en 1979.

En 1969, Susskind ideó la teoría por la que es más conocido: la teoría de cuerdas. Su trabajo matemático demostró que la física de partículas podía explicarse mediante cuerdas vibrantes en el nivel más pequeño. Desarrolló aún más su idea en la década de 1970 y, en 2003, acuñó la frase "cuerda panorama teórico". Esta idea radical tenía como objetivo resaltar la gran cantidad de universos que posiblemente podrían existir, formando un "megaverso" alucinante, incluyendo, tal vez, otros universos con las condiciones necesarias para que exista vida. Susskind sigue siendo muy respetado en el campo hoy en día.

Trabajos clave

2005 *El paisaje cósmico* **2008** *La guerra del agujero negro* **2013** *El mínimo teórico*



Según la supersimetría, cada bosón, o partícula portadora de fuerza, tiene un fermión o partícula de materia "supercompañero" masivo, y cada fermión tiene un bosón "supercompañero" masivo. La teoría de supercuerdas describe a las supercompañeras como cuerdas que vibran en octavas más altas, como los armónicos de un violín. Algunos teóricos de cuerdas predicen que las supercompañeras pueden tener masas hasta 1.000 veces mayores que la de sus partículas correspondientes, pero aún no se han encontrado partículas supersimétricas.

gravitón. La existencia de tal partícula podría explicar por qué la gravedad es tan débil en comparación con las otras tres fuerzas, ya que los gravitones entrarían y saldrían de las aproximadamente 10 dimensiones requeridas por la teoría de cuerdas. Aquí, por fin, parecía haber algo que Einstein había buscado durante mucho tiempo: una teoría que pudiera describir todo en el universo: una "teoría del todo".

Una teoría unificadora

Los físicos que buscan una teoría que lo abarque todo encuentran problemas al considerar los agujeros negros, donde la teoría de la relatividad general se encuentra con la mecánica cuántica al tratar de explicar lo que sucede cuando una gran cantidad de materia se concentra en un área muy pequeña. Según la relatividad general, se podría decir que el núcleo de un agujero negro, conocido como su singularidad, tiene un tamaño esencialmente cero. Pero en la mecánica cuántica eso no es cierto porque nada puede ser infinitamente pequeño. Según el principio de incertidumbre, ideado por el físico alemán Werner Heisenberg en 1927, simplemente no es posible alcanzar niveles infinitamente pequeños porque una partícula siempre puede existir en múltiples estados.

Las teorías cuánticas clave, como la superposición y el entrelazamiento, también dictan que las partículas pueden estar en dos estados a la vez. Deben producir un campo gravitacional, lo que sería coherente con la relatividad general, pero según la teoría cuántica ese no parece ser el caso.

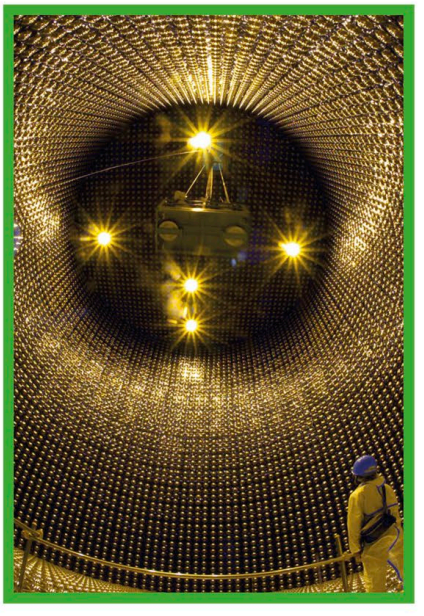
Si la teoría de supercuerdas puede resolver algunos de estos problemas, podría ser la teoría unificadora que los físicos han estado buscando. Incluso podría ser posible probar la teoría de supercuerdas haciendo chocar partículas entre sí. A energías más altas, los científicos creen que podrían ver gravitones disipándose en otras dimensiones, proporcionando una prueba clave para la teoría. Pero no todos están convencidos.

Desentrañando la idea

Algunos científicos, como el físico estadounidense Sheldon Glashow, creen que la búsqueda de la teoría de cuerdas es inútil porque nadie podrá probar si las cuerdas que describe realmente existen o no. Implican energías tan altas (más allá de la medición llamada energía de Planck) que son imposibles de detectar para los humanos, y es posible que sigan siéndolo en el futuro previsible. Ser

La incapacidad de idear un experimento que pueda probar la teoría de cuerdas lleva a científicos como Glashow a preguntarse si pertenece en absoluto a la ciencia. Otros no están de acuerdo y señalan que actualmente se están realizando experimentos para intentar buscar algunos de estos efectos y dar una respuesta. El experimento Super-Kamiokande en Japón, por ejemplo, podría probar aspectos de la teoría de cuerdas buscando la desintegración de protones (la desintegración hipotética de un protón en escalas de tiempo extremadamente largas), lo cual es predicho por supersimetría.

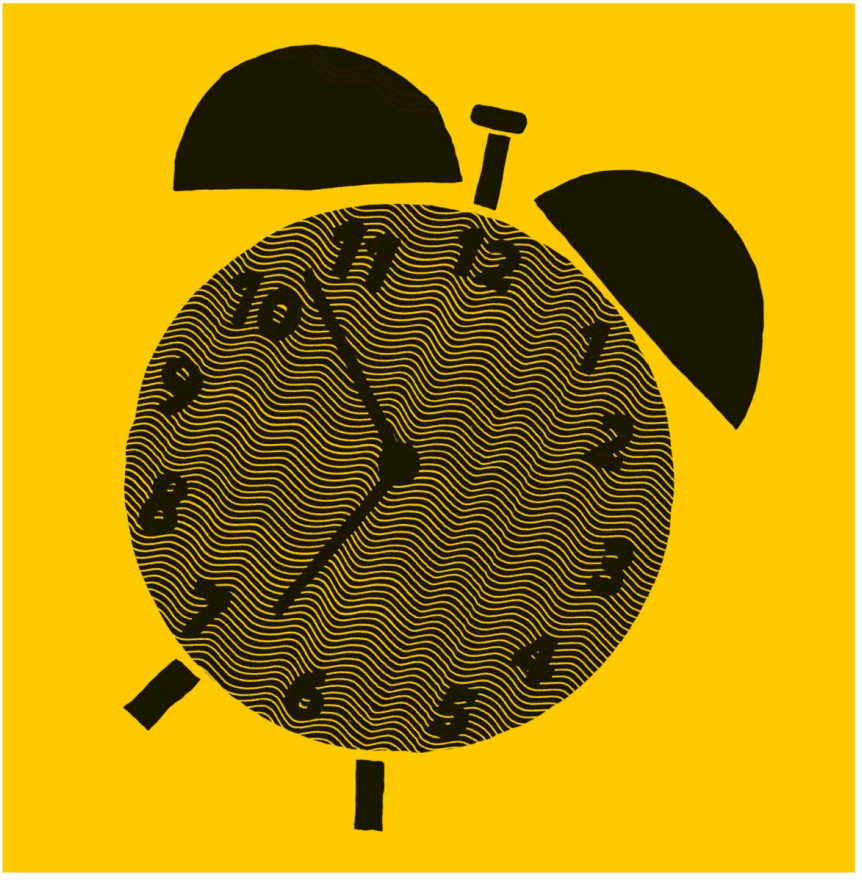
La teoría de supercuerdas puede explicar gran parte del universo desconocido, como por qué el bosón de Higgs es tan ligero y por qué la gravedad es tan débil, y puede ayudar a arrojar luz sobre la naturaleza de la energía y la materia oscuras. Algunos científicos incluso piensan que la teoría de cuerdas podría proporcionar información sobre el destino del universo y si continuará expandiéndose indefinidamente.



Los muros del Super-Kamiokande El observatorio de neutrinos de Japón está repleto de fotomultiplicadores que detectan la luz emitida por los neutrinos al interactuar con el agua dentro del tanque.

ONDULACIONES EN TIEMPO ESPACIAL

ONDAS GRAVITACIONALES



EN CONTEXTO

FIGURAS CLAVES
Barry Barish(1936–),
Kip Thorne(1940–)

ANTES

1915 La teoría de la relatividad general de Einstein proporciona algunas pruebas de la existencia de ondas gravitacionales.

1974 Los científicos observan indirectamente ondas gravitacionales mientras estudian las estrellas púlsar.

1984 En EE.UU. se ha creado el Proyecto del Observatorio de Ondas Gravitacionales con Interferómetro Láser (LIGO) para detectar ondas gravitacionales.

DESPUÉS

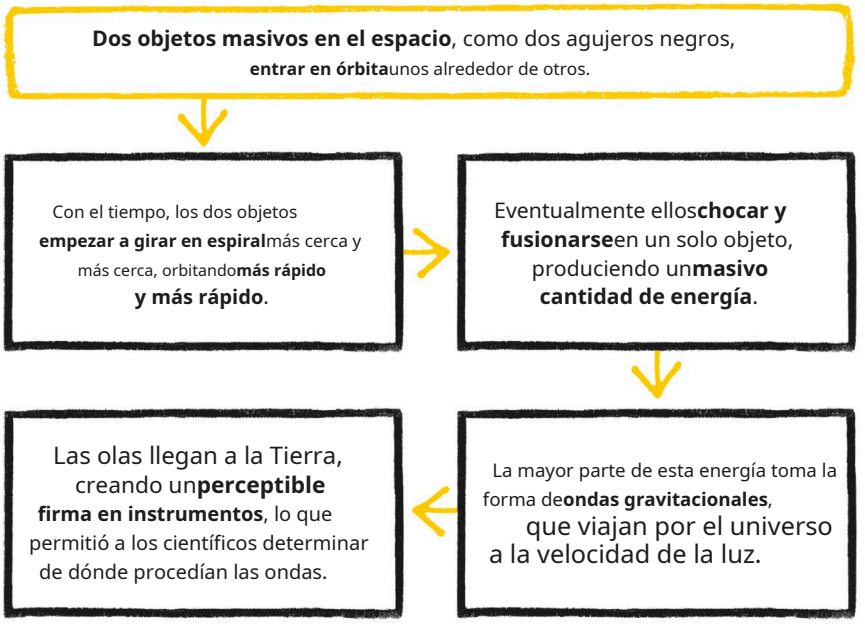
2017 Los científicos detectan Ondas gravitacionales de dos estrellas de neutrones en fusión.

2034 Se espera que la misión de ondas gravitacionales LISA se lance al espacio en 2034 para estudiar las ondas gravitacionales.

En 2016, los científicos hicieron un anuncio que prometía revolucionar la astronomía: en septiembre de 2015, un equipo de físicos había encontrado la primera evidencia directa de ondas gravitacionales, ondas en el espacio-tiempo causadas por la fusión o colisión de dos objetos. Hasta ese momento, el conocimiento del universo y de cómo funciona se derivaba principalmente de lo que se podía ver, en forma de ondas de luz. Ahora, los científicos tenían una nueva forma de sondear agujeros negros, estrellas y otras maravillas del cosmos.

La idea de las ondas gravitacionales ya existía desde hacía más de un siglo. En 1905, el físico francés Henri Poincaré postuló inicialmente

Ver también: Ondas electromagnéticas 192-195 · Ver más allá de la luz 202–203 · De la relatividad clásica a la relatividad especial 274 · Relatividad especial 276–279 · Curvar el espacio-tiempo 280 · Masa y energía 284–285 · Agujeros negros y agujeros de gusano 286–289



la teoría de que la gravedad se transmitía a través de una onda, a la que llamó *la onda gravifique*—la onda gravitacional. Una década después, Albert Einstein llevó esta idea a otro nivel en su teoría de la relatividad general, donde propuso que la gravedad no era una fuerza sino una curvatura del espacio-tiempo, causada por la masa, la energía y el momento.

Einstein demostró que cualquier objeto masivo hace que el espacio-tiempo se doble, lo que a su vez puede doblar la propia luz. Siempre que una masa se mueve y cambia esta distorsión, produce ondas que salen de la masa a la velocidad de la luz. Cualquier masa en movimiento produce estas ondas, incluso cosas cotidianas como dos personas girando en círculo, aunque dichas ondas son demasiado pequeñas para ser detectadas.

A pesar de sus teorías, Einstein luchó con su propia creencia en las ondas gravitacionales y señaló en 1916 que "no existen ondas gravitacionales análogas a las ondas de luz". Volvió a la idea en un nuevo artículo sobre ondas gravitacionales en 1918, sugiriendo que podrían existir pero que no había forma de medirlas jamás. En 1936 volvió a dar marcha atrás y afirmó que las olas no existían en absoluto.

Buscando lo invisible

No fue hasta la década de 1950 que los físicos empezaron a darse cuenta de que las ondas gravitacionales bien podrían ser reales. Una serie de artículos subrayaron que la relatividad general había predicho efectivamente la existencia de las ondas, como método de transferencia de energía a través de la radiación gravitacional.

Sin embargo, la detección de ondas gravitacionales planteó enormes desafíos para los científicos. Estaban bastante seguros de que las ondas estaban presentes en todo el universo, pero necesitaban idear un experimento lo suficientemente sensible como para detectarlas. En 1956, los británicos El físico Félix Pirani demostró que Las ondas gravitacionales moverían las partículas a su paso, lo que, en teoría, podría ser detectable. Luego, los científicos se dedicaron a idear experimentos que podrían medir estas perturbaciones.

Los primeros esfuerzos de detección no tuvieron éxito, pero en 1974, los físicos estadounidenses Russell Hulse y Joseph Taylor encontraron la primera evidencia indirecta de ondas gravitacionales. Observaron un par de estrellas de neutrones (pequeñas estrellas creadas por el colapso de estrellas gigantes) en órbita, una de las cuales era un púlsar (una estrella de neutrones que gira rápidamente). A medida que giraban unas alrededor de otras y se acercaban, las estrellas iban perdiendo energía consistente con la radiación de ondas gravitacionales. El descubrimiento acercó a los científicos un paso más a la prueba de la existencia de ondas gravitacionales.

Las máquinas de olas

Aunque masas tan grandes y de rápido movimiento como las estrellas de neutrones que orbitan entre sí producen potencialmente las ondas gravitacionales más grandes, esas ondas producirían un efecto increíblemente pequeño. Pero desde finales de los años 1970, varios físicos, entre ellos el alemán-estadounidense Rainer Weiss

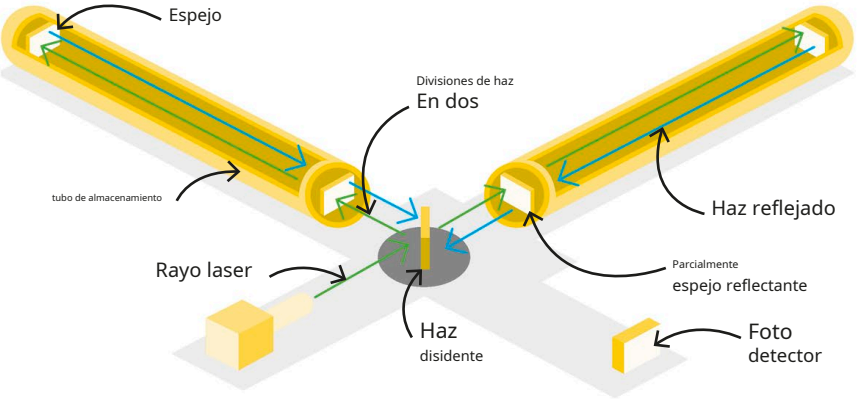
> Se supone que la onda se propaga con la velocidad de la luz.
>
> **Henri Poincaré**

y Ronald Drever, de Escocia, comenzaron a sugerir que sería posible detectar las ondas utilizando rayos láser y un instrumento llamado interferómetro. En 1984, el físico estadounidense Kip Thorne se unió a Weiss y Drever para establecer el Observatorio de Ondas Gravitacionales con Interferómetro Láser (LIGO), con el objetivo de crear un experimento que fuera capaz de detectar ondas gravitacionales.

En 1994, se empezó a trabajar en Estados Unidos con dos interferómetros, uno en Hanford, Washington, y el otro en Livingstone, Luisiana. Fueron necesarias dos máquinas para verificar que cualquier onda detectada fuera gravitacional y no una vibración local aleatoria. La investigación fue dirigida por el físico estadounidense Barry Barish, quien se convirtió en director de LIGO en 1997 y creó la Colaboración Científica LIGO, un equipo de 1.000 científicos de todo el mundo. Esta colaboración global dio al proyecto un impulso renovado y en 2002 los científicos habían completado las dos máquinas LIGO. Cada uno constaba de dos tubos de acero, de 1,2 m (4 pies) de ancho y 4 km (2,5 millas) de largo, protegidos dentro de un refugio de hormigón.

Debido a que las ondas gravitacionales interactúan con el espacio comprimiéndolo y estirándolo en forma perpendicular.

> Damas y caballeros, hemos detectado gravitacional ondas. ¡Lo hicimos!
>
> **Profesor David Reitze**
>
> **físico estadounidense del láser y director LIGO**



LIGO utiliza rayos láser para detectar ondas gravitacionales. Un rayo se dispara hacia un espejo parcialmente reflectante, que divide el rayo en dos tubos de almacenamiento colocados en ángulo recto. Cada haz pasa a través de otro espejo parcialmente reflectante y rebota entre este y un espejo al final del tubo, y parte de la luz de cada tubo se encuentra en el divisor del haz. Si no hay ondas gravitacionales, los haces se anulan entre sí. Si hay ondas presentes, causan interferencia entre los haces, creando una luz parpadeante que se registra en un fotodetector.

dirección, los tubos se construyeron en ángulo recto entre sí, en forma de L. En teoría, una onda que distorsiona el espacio-tiempo cambiaría la longitud de cada tubo, estirando uno y comprimiendo el otro repetidamente hasta que la onda hubiera pasado. Para medir cualquier cambio mínimo, se dividió un rayo láser en dos y luego se iluminó cada tubo. Cualquier onda gravitacional entrante haría que los rayos de luz se reflejaran en diferentes momentos, a medida que el espacio-tiempo mismo se estira y acorta. Al medir este cambio, los científicos esperaban descubrir de dónde procedían las ondas gravitacionales y qué las causaba.

Ondas cataclísmicas

Durante los siguientes ocho años, no se registraron olas, una situación complicada porque las máquinas captaron interferencias, como el ruido del viento e incluso el sonido de los trenes y la maquinaria maderera. En 2010 se decidió revisar por completo ambas máquinas LIGO, y en septiembre de 2015 se volvieron a encender y ahora pudieron escanear un área mucho mayor del espacio. En cuestión de días, los instrumentos nuevos y más sensibles habían captado pequeñas ondas de fracciones de segundo en el espacio-tiempo, llegando a la Tierra desde un evento cataclísmico en algún lugar profundo del universo.

Los científicos pudieron descubrir que estas ondas gravitacionales habían sido producidas por dos agujeros negros que chocaron a unos 1.300 millones de años luz de la Tierra y crearon 50 veces más energía que todas las estrellas del universo en ese momento.
momento. Conocidos como agujeros negros estelares, cada uno de ellos tenía una masa estimada de 36 y 29 veces la masa del sol, formando un nuevo agujero negro que tenía 62 veces la masa del sol. La masa restante (tres veces la del Sol) fue catapultada al espacio casi en su totalidad como ondas gravitacionales. Al medir las señales recibidas de los dos sitios LIGO, respaldadas por el interferómetro Virgo en Italia, los científicos ahora pudieron observar

retroceda en el tiempo hasta el origen de las ondas gravitacionales y estudie nuevas porciones del universo que antes eran simplemente inaccesibles. Podrían hacerlo haciendo coincidir las señales que detectaron con los patrones que esperaban ver en diferentes eventos espacio-temporales.

Desde la detección inicial de ondas gravitacionales en 2015 y el anuncio revolucionario de su descubrimiento en 2016, se han encontrado muchas más señales potenciales de ondas gravitacionales. La mayoría han sido fusiones de agujeros negros, pero en 2017, los científicos de LIGO hicieron su primera detección confirmada de ondas gravitacionales producidas por la colisión de dos estrellas de neutrones, hace unos 130 millones de años.

Señales desde lejos

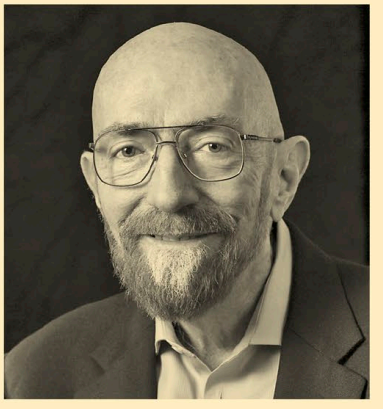
LIGO y Virgo continúan detectando ondas gravitacionales casi semanalmente. El equipo se actualiza periódicamente a medida que los láseres se vuelven más potentes y los espejos más estables. Objetos de apenas el tamaño de una ciudad pueden detectarse en todo el universo, siendo aplastados entre sí en acontecimientos dramáticos que traspasan los límites de la física. El descubrimiento de las ondas gravitacionales está ayudando a los científicos a investigar la naturaleza misma de el universo, revelando cada vez más sobre sus orígenes y expansión, e incluso, potencialmente, su edad.

Empujando los límites del espacio

Los astrónomos también están trabajando en nuevos experimentos que podrían estudiar las ondas gravitacionales con mayor detalle. Una de ellas es una misión, organizada por la Agencia Espacial Europea (ESA), denominada LISA (Laser Interferometer Space Antenna). LISA, cuyo lanzamiento está previsto para 2034, constará de tres naves espaciales que volarán en un triángulo, cada una separada por 2,5 millones de kilómetros (1,5 millones de millas). Se dispararán láseres entre la nave y las señales producidas se estudiarán en busca de evidencia de movimiento minúsculo que podrían ser las ondas de ondas gravitacionales.

Las observaciones de LISA sobre un área tan vasta permitirán a los científicos detectar ondas gravitacionales de una variedad de otros objetos, como agujeros negros supermasivos, o incluso desde los albores del universo. Los secretos del espacio más profundo podrían llegar a descubrirse.

Cuando dos estrellas de neutrones Al chocar, liberan rayos gamma visibles y ondas gravitacionales invisibles, que llegan a la Tierra prácticamente en el mismo momento, millones de años después.



Kip Thorne

Nacido en Utah en 1940, Kip Thorne se graduó en física en el Instituto Tecnológico de California (Caltech) en 1962 antes de completar un doctorado en la Universidad de Princeton en 1965. Regresó a Caltech en 1967, donde ahora es profesor Feynman de Física Teórica. Emeritus.

El interés de Thorne en Las ondas gravitacionales le llevaron a fundar el proyecto LIGO, que ha apoyado identificando fuentes distantes de ondas e ideando técnicas para extraer información de ellas. Por su trabajo sobre ondas gravitacionales y LIGO, Thorne recibió el Premio Nobel de Física en 2017, junto con sus colaboradores Rainer Weiss y Barry Barish.

Thorne también presta sus conocimientos de física a las artes: la película de 2014 *Interestelar* se basó en su concepto original.

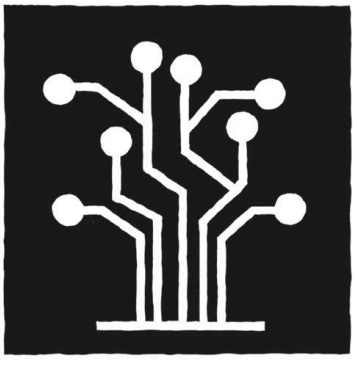
Trabajos clave

1973 *Gravitación*
1994 *Agujeros negros y deformaciones del tiempo*
2014 *La ciencia de* Interestelar

DIRECTO

RY

DIRECTORIO



Como lo expresó memorablemente el propio Isaac Newton en una carta a Robert Hooke en 1675: "Si he visto más lejos, ha sido al subirme a los hombros de Gigantes". Desde sus inicios en Mesopotamia, en el cuarto milenioantes de Cristo, la historia de la ciencia ha sido de colaboración y continuidad. Desde filósofos naturales hasta inventores, experimentadores y, más recientemente, científicos profesionales, muchas más personas han hecho contribuciones importantes a esta historia de las que podrían explorarse en detalle en los capítulos anteriores de este libro. Por lo tanto, el siguiente directorio intenta ofrecer al menos un esbozo de algunas otras figuras clave en nuestra búsqueda aún en desarrollo para comprender la forma en que funciona nuestro universo, desde el núcleo más pequeño hasta la galaxia más lejana.

ARQUÍMEDES

*C.*287antes de Cristo-*C.*212antes de Cristo

Nacido en la colonia griega de Siracusa, en la isla mediterránea de Sicilia, Arquímedes fue uno de los ingenieros, físicos y matemáticos más importantes del mundo antiguo. Poco se sabe de sus primeros años de vida, pero es posible que haya estudiado en Alejandría, Egipto, en su juventud. Aunque más tarde fue aclamado por sus innovadoras demostraciones matemáticas, particularmente en el campo de la geometría, durante su vida fue famoso principalmente por inventos como la bomba de agua de "tornillo de Arquímedes" y la polea compuesta, así como por su famoso descubrimiento, sobre el cual está Se dice que gritó "¡Eureka!", Del principio de Arquímedes, que describe la

desplazamiento del agua. Cuando los romanos invadieron Sicilia, Arquímedes ideó una serie de armas ingeniosas para defender su ciudad. Fue asesinado por un soldado romano a pesar de las órdenes de que lo capturaran vivo. **Ver también:** El método científico 20-23 Fluidos 76–79

HASAN IBN AL-HAYTHAM

*C.*965–1040

El erudito árabe al-Haytham (a veces conocido en Occidente como Alhazen) nació en Basora, ahora Irak, pero pasó Gran parte de su carrera en El Cairo, Egipto. Poco se sabe de su vida, pero inicialmente trabajó como ingeniero civil e hizo contribuciones a la medicina, la filosofía y la teología, así como a la física y la astronomía. Al-Haytham fue uno de los primeros defensores del método científico, ideando experimentos para probar o refutar hipótesis. Es mejor conocido por su*Libro de Óptica*(1021), que combinó con éxito varias teorías clásicas de la luz con observaciones de anatomía, para explicar la visión en términos de rayos de luz reflejados por los objetos, captados por el ojo e interpretados por el cerebro. **Ver también:**El método científico 20-23

- Reflexión y refracción 168–169
- Luz de enfoque 170–175

AVICENA

*C.*980-1037

Ibn Sina (conocido en Occidente como Avicena) fue un erudito persa nacido cerca de Bukhara, en la actual Uzbekistán, en la familia de un funcionario bien ubicado de la dinastía persa samánida. Mostró talento para aprender desde su juventud, absorbiendo las obras de muchos

eruditos islámicos clásicos y anteriores. Aunque hoy en día es más conocido por sus influyentes trabajos sobre medicina, escribió ampliamente en todo el mundo. una variedad de campos, incluida la física. Desarrolló una teoría del movimiento que reconocía el concepto conocido más tarde como inercia y la influencia de la resistencia del aire, y también expuso un argumento inicial de que la velocidad de la luz debe ser finita.

Ver también: Leyes del movimiento 40–45

- La velocidad de la luz 275

JOHANNES KEPLER

1571-1630

El matemático y astrónomo alemán Johannes Kepler se hizo famoso en la década de 1590 por una teoría que intentaba vincular las órbitas de los planetas con la geometría de los "sólidos platónicos" matemáticos. Se convirtió en asistente del gran astrónomo danés Tycho Brahe, que estaba compilando el catálogo más preciso de movimientos planetarios jamás intentado. Después de la muerte de Tycho en 1601, Kepler continuó y desarrolló su trabajo. El éxito de sus leyes del movimiento planetario de 1609, que colocaron a los planetas en órbitas elípticas (en lugar de circulares) alrededor del sol,

completó la "revolución copernicana" y allanó el camino para las leyes más generales del movimiento y la gravitación universal de Newton.

Ver también: Leyes de la gravedad 46–51

- Los cielos 270–271
- Modelos del universo 272–273

EVANGELISTA TORRICELLI

1608-1647

Nacido en la provincia de Rávena, Italia, Torricelli mostró su talento para las matemáticas a una edad temprana y fue enviado a ser educado por monjes en una abadía local. Posteriormente viajó a Roma, donde se convirtió en secretario y alumno no oficial de Benedetto Castelli, profesor de matemáticas y amigo de Galileo Galilei. Torricelli se convirtió en discípulo de la ciencia galileana y compartió muchas discusiones con Galileo en los meses previos a su muerte en 1642. Al año siguiente, Torricelli publicó una descripción del primer barómetro de mercurio, el invento por el que es más conocido en la actualidad.

Ver también: El método científico 20-23
- Presión 36 Fluidos 76–79

GUILLAUME AMONTONS

1663-1705

Guillaume Amontons, nacido en París, era hijo de un abogado. Se dedicó a la ciencia tras perder la audición en la infancia. En gran medida autodidacta, fue un hábil ingeniero e inventor que ideó mejoras para diversos instrumentos científicos. Mientras investigaba las propiedades de los gases, descubrió las relaciones entre temperatura, presión y volumen, aunque no pudo cuantificar las ecuaciones precisas de las posteriores "leyes de los gases". Es mejor recordado por sus leyes de fricción, que describen las fuerzas de fricción estática y deslizante que afectan a los cuerpos cuyas superficies están en contacto entre sí.

Ver también: Energía y movimiento 56–57
- Las leyes de los gases 82–85 Entropía y segunda ley de la termodinámica 94–99

DANIEL GABRIEL FAHRENHEIT

1686-1736

Nacido en Danzig (ahora Gdansk en Polonia) en el seno de una familia de comerciantes alemanes, Fahrenheit pasó la mayor parte de su vida laboral en los Países Bajos. Huérfano en 1701, se formó como comerciante antes de dedicarse a sus intereses científicos y relacionarse con muchos de los principales pensadores de la época, incluidos Ole Rømer y Gottfried Leibniz. Dio conferencias sobre química y aprendió a fabricar delicadas piezas de vidrio para instrumentos científicos como termómetros. Esto lo llevó en 1724 a su concepto de una escala de temperatura estandarizada (aunque la propia elección de puntos de temperatura "fijos" de Fahrenheit fue revisada más tarde para hacer más precisa la escala que todavía lleva su nombre).

Ver también: El método científico 20-23
- Calor y transferencias 80–81

LAURA BASSI

1711-1778

Bassi, hija de un exitoso abogado de Bolonia, Italia, se benefició de una educación con tutoría privada, en la que mostró un temprano interés por la física. En su adolescencia, quedó fascinada por las teorías aún controvertidas de Isaac Newton. Después de doctorarse en filosofía a la edad de 20 años, se convirtió en la primera mujer en ocupar una cátedra universitaria en el estudio de la ciencia. Trabajando en la Universidad de Bolonia, conoció y se casó con un colega profesor, Giuseppe Veratti, y ambos trabajaron estrechamente durante el resto de sus carreras. Bassi ideó muchos experimentos avanzados para demostrar la precisión de la física newtoniana y escribió extensamente sobre mecánica e hidráulica. En 1776, fue nombrada profesora de física experimental de la universidad.

Ver también: Leyes del movimiento 40–45
- Leyes de la gravedad 46–51

WILLIAM HERSCHEL

1738–1822

William Herschel fue un astrónomo nacido en Alemania que se mudó a Inglaterra a la edad de 19 años. Leyó mucho sobre acústica y óptica, y un nombramiento musical permanente en Bath, desde 1766, le permitió dedicarse seriamente a estos intereses. Construyó el mejor espejo telescopios de la época y comenzó a estudiar sistemáticamente las estrellas, ayudado a partir de 1772 por su hermana Carolina. Su descubrimiento del planeta Urano en 1781 le valió el nombramiento para el papel de “astrónomo del rey” de Jorge III de Gran Bretaña. En 1800, mientras medía las propiedades de diferentes colores de la luz visible, descubrió la existencia de la radiación infrarroja.

Ver también: Ondas electromagnéticas 192-195 Los cielos 270–271
- Modelos del universo 272–273

PIERRE SIMON LAPLACE

1749-1827

Al crecer en Normandía, Francia, Laplace mostró un temprano talento para las matemáticas. Ingresó en la universidad de Caen a la edad de 16 años y llegó a ser profesor en la Escuela Militar de París. A lo largo de una larga carrera no sólo produjo importantes trabajos en matemáticas puras, sino que también los aplicó a áreas que van desde la predicción de las mareas y la forma de la Tierra hasta la estabilidad de las órbitas planetarias y la historia del sistema solar. Fue el primero en sugerir que nuestro sistema solar se formó a partir del colapso de una nube de gas y polvo, y también fue el primero en poner la

objetos que ahora llamamos agujeros negros desde un punto de vista matemático.

Ver también: Leyes de la gravedad 46–51
- Modelos del universo 272–273
- Agujeros negros y agujeros de gusano 286–289

SOPHIE GERMAIN

1776-1831

Nacida de un rico comerciante de seda parisino, Germain tuvo que luchar contra los prejuicios de sus padres para poder seguir su interés por las matemáticas. Inicialmente autodidacta, a partir de 1794 obtuvo apuntes de la École Polytechnique y recibió clases privadas de Joseph-Louis Lagrange. Posteriormente, también mantuvo correspondencia con los principales matemáticos de Europa. Aunque más conocida por su trabajo en matemáticas, también hizo

importantes contribuciones a la física de la elasticidad cuando ganó el concurso de la Academia de París (inspirado en los experimentos acústicos de Ernst Chladni) para describir matemáticamente la vibración de superficies elásticas.
Ver también: Estirar y apretar 72–75. Música 164–167

JOSEPH VON FRAUNHOFER
1787–1826

Aprendiz de un vidriero en Alemania después de quedar huérfano a la edad de 11 años, el joven Fraunhofer vio su vida transformada en 1801 después de que el taller de su maestro se derrumbara y un grupo de rescate de dignatarios locales lo sacara de los escombros. El Príncipe Elector de Baviera y otros benefactores alentaron sus inclinaciones académicas y finalmente lo matricularon en un instituto de fabricación de vidrio, donde pudo continuar sus estudios. Los descubrimientos de Fraunhofer permitieron a Baviera convertirse en líder
Centro de fabricación de vidrio para instrumentos científicos. Sus inventos incluyen la rejilla de difracción, para dispersar la luz de diferentes colores, y el espectroscopio, para medir las posiciones precisas de diferentes características en un espectro.
Ver también: Difracción e interferencia 180–183.El efecto Doppler y el corrimiento al rojo 188-191.Luz del átomo 196–199

WILLIAM THOMSON, SEÑOR KELVIN
1824-1907

William Thomson, nacido en Belfast, fue una de las figuras más importantes de la física del siglo XIX. Después de estudiar en las universidades de Glasgow y Cambridge, Reino Unido, el talentoso Thomson regresó a Glasgow como profesor a la edad de sólo 22 años. Sus intereses eran muy variados: ayudó a establecer la ciencia de la termodinámica, calculó la gran edad de la Tierra, e investigó el posible destino del universo mismo. Sin embargo, encontró una fama más amplia como ingeniero eléctrico. e hizo contribuciones clave al diseño del primer cable telegráfico transatlántico, que se estaba planificando en la década de 1850. El éxito final del proyecto en 1866 provocó la aclamación del público, el título de caballero y, finalmente, el ascenso a la nobleza.

Ver también: Calor y transferencias 80–81
- Energía interna y la primera ley de la termodinámica 86–89
- Motores térmicos 90–93

ERNST MACH
1838-1916

Nacido y criado en Moravia (ahora parte de la República Checa), el filósofo y físico austriaco Mach estudió física y medicina en la Universidad de Viena. Inicialmente interesado en el efecto Doppler tanto en óptica como en acústica, se sintió alentado por la invención de Schlieren.

Fotografía (un método para obtener imágenes de ondas de choque que de otro modo serían invisibles) para investigar la dinámica de los fluidos y las ondas de choque formadas alrededor de objetos supersónicos. Aunque es más conocido por este trabajo (y la medición de las velocidades en relación con la velocidad del sonido mediante el "número de Mach"), también hizo importantes contribuciones a la fisiología y la psicología.
Ver también: Energía y movimiento 56–57
- Fluidos 76–79.El desarrollo de la mecánica estadística 104-111

HENRI BECQUEREL
1852-1908

Becquerel, tercero de una familia de físicos parisinos adinerados, que incluiría a su hijo Jean, siguió carreras conjuntas en ingeniería y física. Su trabajo involucró estudios de temas como la polarización plana de la luz, el geomagnetismo y la fosforescencia. En 1896, la noticia del descubrimiento de los rayos X por parte de Wilhelm Röntgen inspiró a Becquerel a investigar si los materiales fosforescentes, como ciertas sales de uranio, producían rayos similares. Pronto detectó algún tipo de emisión de las sales, pero pruebas posteriores demostraron que los compuestos de uranio emitían rayos incluso si no eran fosforescentes. Becquerel fue la primera persona en descubrir la existencia de materiales "radiactivos", por lo que compartió el Premio Nobel de 1903 con Marie y Pierre Curie.
Ver también: Polarización 184–187
- Rayos nucleares 238–239
- El núcleo 240–241

NIKOLA TESLA
1856-1943

Nikola Tesla, físico e inventor serbio-estadounidense, fue una figura enormemente importante en el establecimiento temprano de la energía eléctrica generalizada. Después de demostrar su talento como ingeniero en Hungría, trabajó en las empresas de Thomas Edison en París y más tarde en Nueva York, antes de dejarlo para comercializar sus propios inventos de forma independiente. Uno de ellos, un motor de inducción que podía funcionar con un sistema de corriente alterna (CA), resultó de gran importancia para la adopción generalizada de la corriente alterna. Los muchos otros inventos de Tesla (algunos de ellos adelantados a su tiempo) incluyeron iluminación y energía inalámbricas, vehículos controlados por radio, turbinas sin aspas y mejoras en el propio sistema de aire acondicionado.

Ver también: Corriente eléctrica y resistencia 130–133. El efecto motor 136-137.La inducción y el efecto generador 138-141

J.J.THOMSON
1856-1940

Después de demostrar un talento inusual para la ciencia a una edad temprana, Joseph John Thomson, que nació en Manchester, Reino Unido, fue admitido para estudiar en Owens College (ahora Universidad de Manchester) con solo 14 años. a la Universidad de Cambridge, donde se distinguió en matemáticas antes de ser nombrado Profesor Cavendish de Física en 1884. Hoy en día es principalmente conocido por su descubrimiento del electrón en 1897, que

identificados mediante un análisis cuidadoso de las propiedades de los “rayos catódicos” recientemente descubiertos. Unos meses después del descubrimiento, pudo demostrar que las partículas contenidas en los rayos podían desviarse en campos eléctricos y calcular la relación entre su masa y su carga eléctrica.

Ver también: Teoría atómica 236-237

- Partículas subatómicas 242–243

Cañón de salto de Annie

1863-1941

Jump Cannon, hija mayor de un senador estadounidense por Delaware, aprendió sobre las estrellas a una edad temprana de su madre, quien posteriormente fomentó su interés por la ciencia. Ella floreció en sus estudios, a pesar de un ataque de escarlatina que la dejó casi completamente sorda. Se unió al personal del Observatorio de la Universidad de Harvard en 1896 para trabajar en un ambicioso catálogo fotográfico de espectros estelares. Aquí clasificó manualmente unas 350.000 estrellas, desarrolló el sistema de clasificación que todavía se utiliza ampliamente en la actualidad y publicó los catálogos que eventualmente revelarían la composición estelar.

Ver también: Difracción e interferencia 180–183 Luz del átomo 196–199

- Cuantos de energía 208–211

ROBERT MILLIKAN

1868-1953

Robert Millikan nació en Illinois y estudió clásicos en el Oberlin College de Ohio, antes de dedicarse a la física por sugerencia de su profesor de griego. Luego obtuvo un doctorado en la Universidad de Columbia y comenzó a trabajar en la Universidad de Chicago. Fue aquí, en 1909, donde él y el estudiante graduado Harvey Fletcher idearon un ingenioso experimento para medir la carga del electrón por primera vez. Esta constante fundamental de la naturaleza allanó el camino para el cálculo preciso de muchas otras constantes físicas importantes. **Ver también:**Teoría atómica 236-237

- Partículas subatómicas 242–243

EMMY NOETHER

1882-1935

El matemático alemán Noether mostró un don para las matemáticas y la lógica a una edad temprana y obtuvo un doctorado en la Universidad de Erlangen, Baviera, Alemania, a pesar de las políticas que discriminaban a las estudiantes. En 1915, los matemáticos David Hilbert y Felix Klein la invitaron a su prestigioso departamento de la Universidad de Göttingen para trabajar en la interpretación de la teoría de Einstein de

relatividad. Aquí, Noether hizo enormes contribuciones a los fundamentos de las matemáticas modernas. Sin embargo, en física es más conocida por una prueba, publicada en 1918, de que la conservación de ciertas propiedades (como el momento y la energía) está vinculada a la simetría subyacente de los sistemas y las leyes físicas que los gobiernan. El teorema de Noether y sus ideas sobre la simetría sustentan gran parte de la física teórica moderna.

Ver también: La conservación de la energía 55.

- Portadores de fuerza 258–259 Teoría de cuerdas 308–311

Hans Geiger

1882-1945

Geiger fue un físico alemán que estudió física y matemáticas en la Universidad de Erlangen en Baviera, Alemania, donde obtuvo su doctorado y una beca en la Universidad de Manchester, Reino Unido, en 1906. Desde 1907, trabajó con Ernest Rutherford en la universidad. Geiger había estudiado previamente la descarga eléctrica a través de gases, y los dos hombres formularon un método para aprovechar este proceso para detectar partículas radiactivas que de otro modo serían invisibles. En 1908, bajo la dirección de Rutherford, Geiger y su colega Ernest Marsden llevaron a cabo el famoso "experimento Geiger-Marsden", que mostró cómo unas pocas partículas alfa radiactivas disparadas contra una delgada lámina de oro rebotaban hacia la fuente, demostrando así la existencia de la energía atómica. núcleo.

Ver también: Teoría atómica 236-237

- El núcleo 240–241

LAWRENCE BRAGG

1890-1971

Como hijo de William Henry Bragg (1862-1942), profesor de física en la Universidad de Adelaida en Australia, Lawrence Bragg se interesó desde el principio por el tema. Después de que la familia se mudó al Reino Unido para que William ocupara una cátedra en la Universidad de Leeds, Lawrence se matriculó en la Universidad de Cambridge. Fue aquí, como estudiante de posgrado en 1912, donde se le ocurrió una idea para resolver el largo debate sobre la naturaleza de los rayos X. Razonó que si los rayos X fueran ondas electromagnéticas en lugar de partículas, deberían producir patrones de interferencia debido a la difracción al pasar a través de los cristales. Padre e hijo desarrollaron un experimento para probar la hipótesis, no sólo demostrando que los rayos X son ondas, sino también siendo pioneros en una nueva técnica para estudiar la estructura de la materia.

Ver también: Difracción e interferencia 180–183 Ondas electromagnéticas 192-195

ARTHUR HOLLY COMPTON

1892-1962

Nacido en una familia académica en Wooster, Ohio, Compton era el menor de tres hermanos, todos los cuales obtuvieron doctorados de la Universidad de Princeton. Después de interesarse por cómo los rayos X podían revelar la estructura interna de los átomos, se convirtió en jefe del departamento de física de la Universidad de Washington en St. Louis, en 1920. Fue aquí, en 1923, donde sus experimentos condujeron al descubrimiento de la “dispersión Compton”. ”—la transferencia de energía de los rayos X a los electrones que sólo podría explicarse si los rayos X tuvieran propiedades similares a partículas y ondas. La idea de que la radiación electromagnética tuviera un aspecto similar a una partícula había sido propuesta tanto por Planck como por Einstein, pero el descubrimiento de Compton fue la primera prueba incontrovertible.

Ver también: Ondas electromagnéticas 192-195 Cuantos de energía 208–211

- Partículas y ondas 212–215

IRENE JOLIOT-CURIE

1897-1956

Hija de Marie y Pierre Curie, Irène mostró desde temprana edad talento para las matemáticas. Después de trabajar como radióloga durante la Primera Guerra Mundial, completó sus estudios y continuó sus estudios en el Instituto Radium fundado por sus padres, donde conoció a su futuro marido, el químico Frédéric Joliot. Trabajando juntos, fueron los primeros en medir la masa del neutrón en 1933. También estudiaron lo que sucedía cuando elementos livianos eran bombardeados con partículas alfa radiactivas (núcleos de helio) y descubrieron que el proceso creaba materiales que eran en sí mismos radiactivos. Los Joliot-Curie habían creado con éxito isótopos radiactivos artificiales, logro por el que recibieron el Premio Nobel de Química en 1935.

Ver también: Rayos nucleares 238–239

- El núcleo 240–241 Aceleradores de partículas 252–255

LEO SZILARD

1898-1964

Nacido en una familia judía en Budapest, Hungría, Szilard mostró su talento temprano al ganar un premio nacional de matemáticas a la edad de 16 años. Terminó su educación y se estableció en Alemania, antes de huir al Reino Unido con el ascenso del partido nazi. Aquí cofundó una organización para ayudar a los académicos refugiados y formuló la idea de la reacción nuclear en cadena, un proceso que aprovecha una cascada de partículas de neutrones para liberar energía de los átomos. Después de emigrar a los Estados Unidos en 1938, trabajó con otros para hacer realidad la reacción en cadena como parte del Proyecto Manhattan.

Ver también: Rayos nucleares 238–239

- El núcleo 240–241 Bombas nucleares y energía 248–251

GEORGE GAMO

1904-1968

Gamow estudió física en su ciudad natal, Odessa (entonces parte de la URSS, pero ahora en Ucrania), y más tarde en Leningrado. donde quedó fascinado por la física cuántica. En la década de 1920, la colaboración con colegas occidentales condujo a éxitos como su descripción del mecanismo detrás de la desintegración alfa y la "vida media" radiactiva.
En 1933 desertó de la cada vez más opresiva Unión Soviética y finalmente se instaló en Washington, DC. Desde finales de la década de 1930, Gamow renovó su temprano interés por la cosmología y, en 1948, él y Ralph Alpher esbozaron lo que ahora se llama "nucleosíntesis del Big Bang", la Mecanismo por el cual una gran explosión de energía dio lugar a los elementos en bruto del universo primitivo en las proporciones correctas.

Ver también: Rayos nucleares 238–239

- El zoológico de partículas y los quarks 256-257
- El universo estático o en expansión 294–295 El Big Bang 296–301

J. ROBERT OPPENHEIMER

1904-1967

El genio de Oppenheimer, nacido en Nueva York, comenzó a florecer durante un período de posgrado en la Universidad de Göttingen, Alemania, en 1926, donde trabajó con Max Born y conoció a muchas otras figuras destacadas de la física cuántica. En 1942, Oppenheimer fue contratado para trabajar en los cálculos del Proyecto Manhattan, para desarrollar una bomba atómica en Estados Unidos.
Unos meses más tarde, fue elegido para dirigir el laboratorio donde se construiría la bomba. Después de llevar el proyecto a su conclusión al final de la Segunda Guerra Mundial, cuando se lanzaron bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki en Japón con resultados devastadores, Oppenheimer se convirtió en un crítico abierto del
proliferación nuclear.
Ver también: El núcleo 240–241

- Bombas nucleares y energía 248–251

MARIA GOEPPERT MAYER

1906-1972

Nacido en una familia académica en Katowice (ahora Polonia), Goeppert estudió matemáticas y luego física en la Universidad de Göttingen en Alemania. Su tesis doctoral de 1930 predijo el fenómeno de los átomos. absorber pares de fotones (demostrado más tarde en 1961). En 1930, se casó y se mudó a los Estados Unidos con su marido, un químico estadounidense, pero le resultó difícil obtener un puesto académico. A partir de 1939 trabajó en la Universidad de Columbia, donde participó en la separación de isótopos de uranio necesarios para la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. A finales de la década de 1940, en la Universidad de Chicago, desarrolló el "modelo de capa nuclear", que explica por qué los núcleos atómicos con cierto número de nucleones (protones y neutrones) son particularmente estables. **Ver también:** Rayos nucleares 238–239

- El núcleo 240–241 Bombas nucleares y energía 248–251

DOROTHY PATA DE GALLO HODGKIN

1910-1994

Después de aprender latín específicamente para aprobar el examen de ingreso, Hodgkin estudió en Somerville College, Oxford, antes de trasladarse a Cambridge para realizar trabajos en cristalografía de rayos X. Durante su doctorado, fue pionera en métodos de uso de rayos X para analizar la estructura de moléculas de proteínas biológicas.
Al regresar a Somerville, continuó su investigación y perfeccionó sus técnicas para trabajar con moléculas cada vez más complejas, incluidos los esteroides y la penicilina (ambos en 1945), la vitamina B12 (en 1956, por la que recibió el Premio Nobel de Química en 1964) y insulina (finalmente completado en 1969). **Ver también:**Difracción e interferencia 180–183

- Ondas electromagnéticas 192–195

SUBRAHMANYAN CHANDRASEKHAR

1910-1995

Nacido en Lahore (que entonces formaba parte de la India pero ahora está en Pakistán), Chandrasekhar obtuvo su primera licenciatura en Madrás (ahora Chennai) y continuó sus estudios en la Universidad de Cambridge a partir de 1930. Su trabajo más famoso fue sobre la física de los superdensos. estrellas como las enanas blancas. Demostró que en estrellas con más de 1,44 veces

Debido a la masa del Sol, la presión interna sería incapaz de resistir la atracción de la gravedad hacia adentro, lo que provocaría un colapso catastrófico (el origen de las estrellas de neutrones y los agujeros negros). En 1936, se trasladó a la Universidad de Chicago y se naturalizó como ciudadano estadounidense en 1953.

Ver también:Números cuánticos 216–217
- Partículas subatómicas 242–243
- Agujeros negros y agujeros de gusano 286–289

RUBY PAYNE-SCOTT

1912-1981

La radioastrónoma australiana Ruby Payne-Scott nació en Grafton, Nueva Gales del Sur, y estudió ciencias en la Universidad de Sydney, graduándose en 1933. Después de sus primeras investigaciones sobre el efecto de los campos magnéticos en los organismos vivos, se interesó por las ondas de radio, liderando a su trabajo en el Laboratorio de Radiofísica del gobierno australiano sobre tecnología de radar durante la Conferencia Mundial
Segunda Guerra. En 1945, fue coautora del primer informe científico que relacionaba el número de manchas solares con las emisiones de radio solares. Más tarde, ella y sus coautores establecieron un observatorio que fue pionero en formas de localizar fuentes de radio en el Sol, vinculando de manera concluyente las ráfagas de radio con la actividad de las manchas solares.

Ver también: Ondas electromagnéticas 192-195 Ver más allá de la luz 202–203

FRED HOYLE

1915-2001

Hoyle nació en Yorkshire, Reino Unido, y estudió matemáticas en la Universidad de Cambridge antes de trabajar en el desarrollo del radar durante la Segunda Guerra Mundial. Las conversaciones con otros científicos sobre el proyecto despertaron el interés por la cosmología, mientras que los viajes a Estados Unidos ofrecieron información sobre las últimas investigaciones en astronomía y física nuclear. Años de trabajo lo llevaron en 1954 a su teoría de la nucleosíntesis de supernovas, explicando cómo los elementos pesados se producen dentro de estrellas pesadas y se dispersan por todo el universo cuando
explotar. Hoyle se hizo famoso como autor y científico popular, aunque abrazó algunas opiniones más controvertidas, incluida su no aceptación de la teoría del Big Bang.

Ver también: Fusión nuclear en estrellas 265
- El universo estático o en expansión 294–295 El Big Bang 296–301

SUMIO IIJIMA

1939–

Nacido en la prefectura de Saitama, Japón, Iijima estudió ingeniería eléctrica y física del estado sólido. En la década de 1970, utilizó la microscopía electrónica para estudiar materiales cristalinos en la Universidad Estatal de Arizona, y continuó investigando las estructuras de partículas sólidas muy finas, como los recién descubiertos "fulerenos" (bolas de 60 átomos de carbono), a su regreso a Japón. en los años 1980. Desde 1987, trabajó en la división de investigación del gigante de la electrónica NEC, y fue aquí, en 1991, donde descubrió e identificó otra forma de carbono, estructuras cilíndricas de inmensa resistencia, ahora conocidas como nanotubos.

Las posibles aplicaciones de este nuevo material han contribuido a estimular una ola de investigación en nanotecnología.

Ver también: Modelos de materia 68–71
- Nanoelectrónica 158 Teoría atómica 236-237

STEPHEN HAWKING

1942-2018

Quizás el científico más famoso de los tiempos modernos, Hawking fue diagnosticado con una enfermedad de la neurona motora en 1963, mientras estudiaba su doctorado en cosmología en la Universidad de
Cambridge. Su tesis doctoral en 1966 demostró que la teoría del Big Bang, en la que el universo se desarrolló a partir de un punto denso e infinitamente caliente llamado singularidad, era consistente con la relatividad general (socavando una de las últimas objeciones importantes a la teoría). Hawking pasó los primeros años de su carrera investigando los agujeros negros (otro tipo de singularidad) y en 1974 demostró que deberían emitir una forma de radiación. Su trabajo posterior abordó cuestiones sobre la evolución del universo, la naturaleza del tiempo y la unificación de la teoría cuántica con gravedad. Hawking también se hizo famoso como comunicador científico después de la publicación de su libro en 1988. *Una breve historia del tiempo*.

Ver también: Agujeros negros y agujeros de gusano 286–289 El Big Bang 296–301
- Teoría de cuerdas 308–311

ALAN GUTH

1947–

Guth, que inicialmente estudiaba física de partículas, cambió el enfoque de su trabajo después de asistir a conferencias sobre cosmología en la Universidad de Cornell en 1978-1979.
Propuso una solución a algunas de las grandes preguntas sin respuesta sobre el universo, introduciendo la idea de un breve momento de violenta "inflación cósmica", que hizo estallar una pequeña parte del universo infantil para dominar todo el resto, sólo una fracción. de segundo después del propio Big Bang. La inflación ofrece explicaciones a preguntas como por qué el universo que nos rodea parece tan uniforme. Otros han tomado la idea como un trampolín para sugerir que nuestra "burbuja" particular es una de muchas en un "multiverso inflacionario".

Ver también: Asimetría materia-antimateria 264 El universo estático o en expansión 294–295 El Big Bang 296–301

FABIOLA GIANOTTI

1960–

Después de obtener un doctorado en física de partículas experimental en la Universidad de Milán, Gianotti se unió al CERN (la Organización Europea para la Investigación Nuclear), donde participó en la investigación y el diseño de varios experimentos utilizando los distintos aceleradores de partículas de la organización. Lo más significativo es que fue líder del proyecto en el enorme experimento ATLAS en el Gran Colisionador de Hadrones, liderando el análisis de datos que pudo confirmar la existencia del bosón de Higgs, el último elemento faltante en el Modelo Estándar de física de partículas, en 2012.

Ver también: Aceleradores de partículas 252–255
- El zoológico de partículas y los quarks 256-257
- El bosón de Higgs 262-263

GLOSARIO

En este glosario, los términos definidos en otra entrada se identifican con *itálico* tipo.

Cero absoluto La temperatura más baja posible: 0K o –459,67°F (–273,15°C).

Aceleración La tasa de cambio de *velocidad*. La aceleración es causada por un *fuerza* que resulta en un cambio en la dirección y/o velocidad de un objeto.

Resistencia del aire El *fuerza* que resiste el movimiento de un objeto a través del aire.

Partícula alfa A *partícula* hecho de dos *neutrones* y dos *protones*, que se emite durante una forma de *desintegración radioactiva* llamado desintegración alfa.

Corriente alterna (CA) Un *corriente eléctrica* cuya dirección se invierte a intervalos regulares. Ver también *Corriente continua (CC)*.

Momento angular Una medida de la rotación de un objeto, que tiene en cuenta su *masa*, forma y *girar* velocidad.

Antimateria *Partículas* y *átomos* que están hechos de *antipartículas*.

Antipartícula A *partícula* que es lo mismo que una partícula normal excepto que tiene un opuesto *carga eléctrica*. Cada partícula tiene una antipartícula equivalente.

Átomo La parte más pequeña de un *elemento* que tiene las propiedades químicas de ese elemento. Un Se pensaba que el átomo era la parte más pequeña del *asunto*, pero muchos subatómicos *partículas* ahora se conocen.

desintegración beta una forma de *desintegración radioactiva* en el que un atómico *núcleo* emite beta *partículas* (*electrones* o *positrones*).

Big Bang El evento con el que se cree que comenzó el universo, hace unos 13.800 millones de años, al explotar desde un *singularidad*.

cuerpo negro Un objeto teórico que absorbe todo. *radiación* que cae sobre él, irradia *energía* según su temperatura, y es el emisor de radiación más eficiente.

Agujero negro Un objeto en el espacio que es tan denso que la luz no puede escapar de su gravedad. *campo*.

bosones Subatómico *partículas* ese intercambio *efectivo* entre otras partículas y proporcionar partículas con *masa*.

Circuito El camino alrededor del cual un *corriente eléctrica* puede fluir.

Mecanica clasica Conjunto de leyes que describen el movimiento de los cuerpos bajo la acción de *efectivo*.

Coeficiente un número o *expresión*, generalmente un *constante*, que se coloca delante de otro número y lo multiplica.

Conductor Sustancia a través de la cual el calor o *corriente eléctrica* fluye fácilmente.

Constante Una cantidad en una matemática. *expresión* que no varía, a menudo simbolizado por una letra como a, b, o C.

microondas cósmico fondo (CMB) Débil microonda *radiación* que es detectable desde todas las direcciones. La CMB es la radiación más antigua del universo, emitida cuando el universo tenía 380.000 años. Su existencia fue predicha por el *Big Bang* teoría, y se detectó por primera vez en 1964.

Rayos cósmicos Altamente enérgico *partículas*, como *electrones* y *protones*, que viajan por el espacio a una velocidad cercana a la de la luz.

Constante cosmológica Un término que Albert Einstein añadió a su *relatividad general* ecuaciones, que se utiliza para modelar la *energía oscura* que está acelerando la expansión del universo.

Energía oscura Una fuerza poco comprendida que actúa en dirección opuesta a *gravedad*, provocando que el universo se expanda. Alrededor de las tres cuartas partes de la *masa-energía* del universo es energía oscura.

Materia oscura Invisible *asunto* que sólo puede detectarse por su efecto gravitacional sobre la materia visible. La materia oscura mantiene unidas a las galaxias.

Difracción la flexión de *ondas* alrededor de obstáculos y extendiéndose en olas a través de pequeñas aberturas.

Corriente continua (CC) Un *corriente eléctrica*que fluye en una sola dirección. Ver también *Corriente alterna (CA)*.

efecto Dopplerel cambio en *frecuencia*de un*ola*(como una onda de luz o sonido) experimentado por un observador en movimiento relativo a la fuente de la onda.

Colisión elástica Una colisión en la que no hay cinética.*energía*está perdido.

Carga eléctrica Una propiedad subatómica.*partículas*que hace que se atraigan o repelan entre sí.

Corriente eléctrica Un flujo de objetos con*carga eléctrica*.

Fuerza electromagnetica Uno de los cuatro*fuerzas fundamentales*de la naturaleza. Implica la transferencia de *fotones* entre*partículas*.

Radiación electromagnética una forma de*energía*que se mueve por el espacio. Tiene un campo eléctrico y uno magnético que oscilan perpendicularmente entre sí. La luz es una forma de radiación electromagnética.

Espectro electromagnético La gama completa de*radiación electromagnética*. Ver también*Espectro*.

Teoría electrodébil Una teoría que explica la*electromagnético* y*fuerza nuclear débil*como una fuerza "electrodébil".

Electrónun subatómico*partícula* con un negativo*carga eléctrica*.

ElectrólisisUn cambio químico en una sustancia causado por el paso de una *corriente eléctrica*a traves de.

ElementoSustancia que no puede descomponerse en otras sustancias mediante reacciones químicas.

EnergíaLa capacidad de un objeto o sistema para hacer*trabajar*. La energía puede existir en muchas formas, como energía potencial (por ejemplo, la energía almacenada en un resorte) y energía cinética (movimiento). Puede cambiar de una forma a otra, pero nunca puede crearse ni destruirse.

EnredoEn física cuántica, la relación entre *partículas*de tal manera que un cambio en uno afecta al otro sin importar cuán separados estén en el espacio.

entropíaUna medida del desorden de un sistema, basada en el número de formas específicas en que se puede organizar un sistema en particular.

Horizonte de eventos Un límite que rodea un*agujero negro*dentro del cual la atracción gravitacional del agujero negro es tan fuerte que la luz no puede escapar. Ninguna información sobre el agujero negro puede cruzar su horizonte de sucesos.

exoplanetaUn planeta que orbita una estrella que no es nuestro sol.

ExpresiónCualquier combinación significativa de símbolos matemáticos.

Fermiónun subatómico*partícula*, como un*electrón*o un*cuarc*, que está asociado con*masa*.

CampoLa distribución de un*fuerza* al otro lado de*tiempo espacial*, en el que a cada punto se le puede dar un valor para esa fuerza. Un campo gravitacional es un ejemplo de un campo en el que la fuerza se siente en un punto particular.

es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente de*gravedad*.

FuerzaUn empujón o un tirón, que mueve o cambia la forma de un objeto.

Líneas FraunhoferLíneas de absorción oscuras encontradas en el*espectro*del sol, identificado por primera vez por el físico alemán Joseph von Fraunhofer.

FrecuenciaEl número de*ondas* que pasan un punto cada segundo.

FricciónA*fuerza*que resiste o detiene el movimiento de los objetos que están en contacto entre sí.

Fuerzas fundamentales El cuatro *efectivo*que determinan cómo se comporta la materia. Las fuerzas fundamentales son las*fuerza electromagnetica*, *gravedad*, el*fuerza nuclear fuerte*, y el*fuerza nuclear débil*.

GalaxiaUna gran colección de estrellas y nubes de gas y polvo que se mantienen unidas por*gravedad*.

desintegración gamma Una forma de desintegración radiactiva en la que un núcleo atómico emite altas*energía*, corto-*longitud de onda* gama*radiación*.

Relatividad general Una descripción teórica de*tiempo espacial*en el que Einstein consideró*acelerador* Marcos de referencia. La relatividad general proporciona una descripción de *gravedad* como la deformación del espacio-tiempo por*energía*.

GeocentrismoUn modelo histórico del universo con la Tierra en su centro. Ver también*heliocentrismo*.

Gluones*Partículas*dentro*protones*y *neutrones*que aguante*quarks*juntos.

onda gravitacionaluna distorsión de *tiempo espacial*que viaja a la velocidad de la luz, generada por la *aceleración* de*masa*.

GravedadA*fuerza*de atracción entre objetos con*masa*. sin masa *fotones*También se ven afectados por la gravedad, que *relatividad general*describe como una deformación de*tiempo espacial*.

Muerte por calor Un posible estado final del universo en el que no hay diferencias de temperatura en el espacio ni*trabajar*puede hacerse.

heliocentrismoUn modelo del universo con el sol en su centro.

bosón de Higgs Una partícula subatómica asociada al Higgs *campo*, cuya interacción con otros *partículas*les da su*masa*.

Gas ideal Un gas en el que hay cero inter-*fuerzas de partículas*. Las únicas interacciones entre partículas en un gas ideal son*colisiones elásticas*.

InerciaLa tendencia de un objeto a seguir moviéndose o permanecer en reposo hasta que*fuerza*actúa sobre ello.

AislanteMaterial que reduce o detiene el flujo de calor, electricidad o sonido.

InterferenciaEl proceso por el cual dos o más*ondas*se combinan, reforzándose mutuamente o anulándose mutuamente.

IonUn*átomo*, o grupo de átomos, que ha perdido o ganado uno o más de sus*electrones*cargarse eléctricamente.

Isótopos*átomos*de la misma*elemento* que tienen el mismo número de *protones*, pero un número diferente de*neutrones*.

Año luz Unidad de distancia que es la distancia recorrida por la luz en un año, equivalente a 5.878 billones de millas (9.460 billones de kilómetros).

leptones*Fermiones*que sólo se ven afectados por dos de los*fuerzas fundamentales*-el*fuerza electromagnetica* y el*fuerza nuclear débil*.

MagnetismoA*fuerza*de atracción o repulsión ejercida por los imanes. El magnetismo surge del movimiento de *cargas eléctricas*o del momento magnético de*partículas*.

MasaPropiedad de un objeto que es una medida de la*fuerza*necesaria para acelerarlo.

AsuntoCualquier sustancia física. Todo nuestro mundo visible está hecho de materia.

MoléculaSustancia formada por dos o más*átomos*que están unidos químicamente entre sí.

Impulsode un objeto*masa* multiplicado por su*velocidad*.

neutrinoUn electricamente neutro *fermión*que tiene un tamaño muy pequeño, aún no medido, *masa*. Los neutrinos pueden atravesar*asunto* sin ser detectado.

NeutrónUn subatómico eléctricamente neutro.*partícula*que forma parte de un*átomo*'s*núcleo*. Un neutrón está formado por uno*cuarc*y dos quarks abajo.

Fisión nuclear Un proceso mediante el cual el*núcleo*de un*átomo* se divide en dos núcleos más pequeños, liberando *energía*.

Fusión nuclear Un proceso por el cual atómico*núcleos*se unen para formar núcleos más pesados, liberando*energía*. Dentro de estrellas como el Sol, este proceso implica la fusión de núcleos de hidrógeno para producir helio.

NúcleoLa parte central de un *átomo* . El núcleo está formado por *protones*y*neutrones*y contiene casi todo el átomo*masa*.

ÓpticaEl estudio de la visión y el comportamiento de la luz.

OrbitaEl camino de un cuerpo alrededor de otro cuerpo más masivo.

PartículaUna pequeña mota de *asunto* que puede tener*velocidad*, posición, *masa*, y*carga eléctrica*.

Efecto fotoeléctrico La emisión de *electrones*de las superficies de ciertas sustancias cuando la luz incide sobre ellas.

FotónEl*partícula*de luz que transfiere la*fuerza electromagnetica* de un lugar a otro.

PiezoelectricidadElectricidad que se produce al aplicar tensión a ciertos cristales.

AviónSuperficie plana en la que dos puntos cualesquiera pueden unirse mediante una línea recta.

PlasmaUn fluido caliente cargado eléctricamente en el que*electrones*están libres de sus*átomos*.

luz polarizada Luz en la que el *ondas* todos oscilan en uno solo*avión*.

PositrónEl*antipartícula* contraparte de un*electrón*, con el mismo*masa*pero un positivo *carga eléctrica*.

Diferencia de potencialla diferencia en*energía*por unidad de carga entre dos lugares en un circuito eléctrico. *campo*o circuito.

PresiónUn continuo*fuerza*por unidad de área que empuja contra un objeto. La presión de los gases es causada por el movimiento de sus*moléculas*.

ProtónA*partícula*en el*núcleo*de un *átomo*que tiene carga positiva. Un protón contiene dos*quarks*y un quark abajo.

cuantosPaquetes de*energía*que existen en unidades discretas. En algunos sistemas, un cuanto es la menor cantidad de energía posible.

Electrodinámica cuántica (QED) Una teoría que explica la interacción de las sustancias subatómicas.*partículas*en términos de intercambio de*fotones*.

Mecánica cuántica La rama de la física que se ocupa de las subatómicas. *partículas* comportándose como*cuantos*.

Cuarcun subatómico*partícula*eso *protones*y*neutrones*están hechos de.

RadiaciónUn electromagnético *ola*o una corriente de*partículas* emitido por una fuente radiactiva.

Desintegración radioactiva El proceso en el que la energía atómica inestable*núcleos* emitir*partículas*o*radiación electromagnética*.

corrimiento al rojo El estiramiento de la luz emitida por*galaxias*alejándose de la Tierra, debido a la*efecto Doppler*. Esto hace que la luz visible se mueva hacia el extremo rojo de la*espectro*.

RefracciónLa flexión del electromagnético.*ondas*a medida que pasan de un medio a otro.

ResistenciaUna medida de cuánto se opone un material al flujo de*corriente eléctrica*.

SemiconductorUna sustancia que tiene una*resistencia*en algún lugar entre el de un*conductor*y un*aislante*.

Singularidadun punto en*tiempo espacial* con longitud cero.

Tiempo espacial Las tres dimensiones del espacio se combinaron con una cuarta dimensión, el tiempo, para formar un continuo único.

Relatividad especial La teoría de Einstein de que un tiempo absoluto o un espacio absoluto son imposibles. La relatividad especial es el resultado de considerar que tanto la velocidad de la luz como las leyes de la física son las mismas para todos los observadores.

EspectroEl rango de la *longitudes de onda*de *radiación electromagnética*. El espectro completo abarca desde rayos gamma, con longitudes de onda más cortas que una*átomo* , hasta las ondas de radio, cuya longitud de onda puede tener muchos kilómetros de longitud.

GirarUna cualidad subatómica *partículas*que es similar a *momento angular*.

Modelo estandar El marco de *partícula*física en la que hay 12 fundamentales*fermiones*-seis *quarks*y seis*leptones*.

Teoria de las cuerdas Un marco teórico de la física en el que los puntos*partículas*son reemplazados por cadenas unidimensionales.

Fuerte fuerza nuclear Uno de los cuatro*fuerzas fundamentales*, que une*quarks*juntos para formar *neutrones*y*protones*.

supernovaEl resultado del colapso de una estrella masiva, provocando una explosión que puede ser miles de millones de veces más brillante que el sol.

SuperposiciónEn física cuántica, el principio de que, hasta que se mide, un*partícula*tal como un *electrón*existe en todos sus estados posibles al mismo tiempo.

TermodinámicaLa rama de la física que se ocupa del calor y su relación con*energía*y*trabajar*.

Dilatación del tiempo El fenómeno por el cual dos objetos se mueven uno respecto del otro, o en diferentes gravitacional*campos*, experimentan un ritmo diferente de flujo de tiempo.

Principio de incertidumbre Propiedad de la mecánica cuántica mediante la cual cuantas más exactamente ciertas cualidades, como*impulso*, se miden, menos se sabe de otras cualidades como la posición, y viceversa.

VelocidadUna medida de la velocidad y dirección de un objeto.

VoltajeUn término común para electricidad.*diferencia de potencial*.

OlaUna oscilación que viaja a través del espacio, transfiriendo *energía* de un lugar a otro.

Longitud de onda La distancia entre dos picos sucesivos o dos valles sucesivos en un*ola*.

Fuerza nuclear débil Uno de los cuatro *fuerzas fundamentales*, que actúa dentro de un átomo*núcleo*y es responsable de *desintegración beta*.

TrabajarEl*energía*transferido cuando un*fuerza*mueve un objeto en una dirección particular.

ÍNDICE

Números de página en **atrevido** consulte las entradas principales.

A

Abd al-Rahman al Sufi 268, 290
aberración, aceleración cromática y esférica 174
  energía y movimiento 56
  gravitacional 35, 44, 49, 77
  leyes del movimiento 16, 32–34, 43, 44–45, 53
discos de acreción 289
acciones y reacciones iguales 45
aeronáutica 78
presión de aire 83–84, 91, 106–107
resistencia del aire 35, 42, 44, 45, 50
flujo de aire 78
al-Ghazali 70
al-Khwarizmi, Muhammad Musa 26, 28
Alberto, Guillermo 72
álgebra 28, 30–31
Allen, John F. 79, 228
partículas alfa/radiación 234, 238, 239, 240–241, 243, 247, 252, 253
Alpher, Ralph 299
electricidad de corriente alterna (CA) 150–151, 153
ámbar 120, 124, 125, 130
Amontons, Guillaume **319**
Ampère, André-Marie 121, 134, 136, **137**, 144, 146, 179, 187
Ley de Ampère-Maxwell 146-147
amplitud 203
radio de modulación de amplitud (AM) 153
ampollas de Lorenzini 156
anatomía 22
Anderson, Carl D. 235, 245, 246, 247, 264
Andrews, Thomas 100, 101
Galaxia de Andrómeda 268, 269, 290, 292–293, 303–304, 305
animales, bioelectricidad 128, 129, **156**
ánodos 153, 242
antielectrones 245, 246
antimateria 127, 231, **246**, 300
  asimetría materia-antimateria **264**
antineutrinos 259
antineutrones 300
antiprotones 127, 246, 300
antiquarks 257
síntesis de apertura 202, 203
Arago, François 182, 183, 187
Arquímedes 27, 77, **318**
Arquitas 167
Aristarco de Samos 22
Aristóteles 12, 20, **21**, 22, 32–3, 34, 42, 43, 48, 70, 164, 167, 212, 268, 270, 271, 272, 275
Aruni 69
Aspecto, Alain 207, 223, 228 Atkins, Peter William 96 bombas atómicas *ver* armas nucleares relojes atómicos 38, 39, **229**, 282 desintegración atómica 238, 239, 258–259 masa atómica 236

estructura atómica 13, 67, 123, 196, 198–199, 216, 217, 218, 220, **240–243**
teoría atómica 69–71, 85, **236–237**, **240–243**
atomismo 66, 69, 70–71
átomos 66, **68–71**, 110
  luz de **196–199**, 217
  modelos 206, 216–217, 218, 220, 241, 242–243
  dividiendo 71, **248–251**, 252, 253, 285 atracción

  fuerzas de **102-103**
  y repulsión 120–121, 122, 126
Avicena **318**
Avogadro, Amadeo 67, 79, 85, 236

B

mesones B 264
Tocino, Francisco 20, 23
Panadero, Donald 200
Balmer, Johann Jakob 197–198
Bardeen, Juan 152, **155**, 228 Barish, Barry 312, **314**, 315 paradoja del poste de granero **283**
barómetros 83, 84, 106
Bartholin, Rasmus 163, 185
bariones 245, 256
Bassi, Laura **319**
baterías 120, 128, 129, 131, 134, 141, 148–149
Becquerel, Edmond 208
Becquerel, Enrique 234, 238, 239, **320**
Beeckman, Isaac 82, 83, 275 Bell, Alexander Graham 135 Bell, John Stewart 207, 222, **223** Bell Burnell, Jocelyn 163, 202, **203** Berkeley, Jorge 45
Bernoulli, Daniel 36, 52, 53, 66, 76–79, **77**, 106–107
Bernoulli, Jacob 74
partículas beta/radiación 234, 235, 239, 258–259
Bethe, Hans **265**, 284
Gran explosión 255, 264, 269, 293, **296–301**, 307, 310
Gran crisis 295
estrellas binarias 190–191
bioelectricidad 128, 129, **156** Biot, Jean-Baptiste 85, 187
birrefringencia 163, 185, 186
Black, Joseph 66, **80–81**, 86, 91
agujeros negros 216, 269, **286–289**, 303, 311, 312, 313, 314, 315
radiación de cuerpo negro 67, 114, 115, 116, 117, 208–209
Bohr, Niels 196, 198–199, **199**, 206, 207, 212, 216–217, 218, 220, 221, 222, 234, 240, 241, 243
Boltzmann, Ludwig 79, 96, 106, 107, 108–111, **109**
Bolyai, János 30
Bombelli, Rafael 29
bonos 100, **102-103**
Borelli, Giovanni 49
Nacido, Max 207, 217, 218, 251 boro 85, 154, 253
Condensados de Bose-Einstein 79
bosones 225, 235, 247, 257, 258, 259, 262–263, 308, 309, 310, 311
Boyle, Robert 66, 68, 73, 74, 78, **82–84**, 90, 106
Boyle, Guillermo 176
Bradley, James 188
Bragg, Lorenzo **321**
Brahmagupta 26, 29
Bramah, José 36, 71
Marca, Hennig 196
Brattain, Walter 154, 155
Brewster, David 187
Brout, Robert 262
Marrón, Robert 107, 237
Movimiento browniano 71, 106, **107**, 110, 237
Brus, Luis 230
cámaras de burbujas 244, 259
Bullialdus, Ismael 49
Bunsen, Robert 115, 180, 190, 197, 216
Buridan, Jean 37
efecto mariposa 111
Compra boleta, CHD 189–190

C

Cabrera, Blas 159
Cajori, Florián 166
cálculo 27, 29-30
teoría calórica 86, 87, 88, 107, 108
Cañón, Annie Jump **321**
condensadores 253
Capra, Fritjof 223
Cardano, Gerolamo 29
Carnot, Sadi 13, 67, 86, 90, 91–93, **92**, 96 partículas portadoras 224, 257, 259, 262, 309, 311 rayos catódicos 195, 234, 242
cátodos 153, 195, 242
Caton, Richard 156
Cauchy, Augustin-Louis 72
Cavendish, Henry 130
Celsius, Anders 80
Variables cefeidas 291–292, 293
CERN 223, 235, 246, 264
  Cámara de burbujas Gargamelle 259 Gran Colisionador de Hadrones (LHC) 252, 263, 278, 284, 285, 305, 308, 310
  Súper Sincrotrón de Protones 255, 258, 259, 262
Chadwick, James 216, 234, 235, **243**, 248, 253
reacciones en cadena 249, 250, 251, 284–285
Chandrasekhar, Subrahmanyan 216, 286, 287, **322–323**
teoría del caos 111
Carlos, Jacques 66, **82–84** encantar quarks 235, 256, 257, 264
Chernobyl 248, 251
Clapeyron, Benoît Paul Émile 67, 93
Clarke, Edward 197
Clausius, Rodolfo 67, 82, 86, 88–89, **96**, 97–99, 108, 110
Clegg, Brian 231
relojes 38–39
cámaras de niebla 244–245
cúmulos, galaxia 303
Cockcroft, Juan 252-254, **255**
colisiones
  impulso 37, 54
  partículas 127, 133
espectro de colores 114, 115, 117, 177, 182, 183, 192, 193
compases 122, 123, 135, 144
números complejos 29
microscopios compuestos 174–175
compuestos 67, 71, 237
Compton, Arturo 206, 208, 211, 214, 245, **321**
dinámica de fluidos computacional (CFD) 79

ordenadores
almacenamiento de datos**157**
electrónica 153–154, 155
computación cuántica 207, 222, 223, 228, **230–231**
condensados 79, 228
condensación 67, 102
conducción 81
bandas de conducción 154
conductores 131, 132, 133, 138, 141, 146
Conselice, Christopher 290
conservación de carga 127, 264 conservación de energía**55**, 66, 86, 87, 88, 89, 96, 109, 258
conservación del impulso 37, 54
convección 81
Cooper, León 155, 228
Interpretación de Copenhague 207, 218, 219, 220, **221**, 222
Copérnico, Nicolás 12, 16, 20, 22–23, 33, 42, 48, 268, 270, 271, 272,**273**, 290 modelo corpuscular de luz 177, 178, 181, 183, 186, 187
polvo cósmico 292
huevo cósmico 299
radiación cósmica de fondo de microondas (CMBR) 298, 299–301, 306, 307 rayos cósmicos 234, 244, 245, 246, 247, 256 constante cosmológica 294, 295, 299, 306, 307 Coulomb, Charles-Augustin de 120–121, 124–126, **127**
Cowan, Clyde 235, 258, 259, 261
Simetría CP 264
Simetría CPT 264
Nebulosa del Cangrejo 98,
271 Crick, Francis 23
puntos críticos 101, 102, 103
Cronin, James 264
Crooks, Guillermo 240
cristales 154–155, 184, 185, 186, 187, 195
piezoeléctrico 201
Ctesibio 90
codos 16, 18-19
Curie, Jacques 200,**201**
Curie, María 201, 234, 238–239,**239**, 248 Curie, Pedro 159, 200,**201**, 238, 239, 248, 283 Curtis, Heber 292, 293
aceleradores ciclotrón 254
Cygnus X-1 286, 288, 289

D

D-mesones 264
da Vinci, Leonardo 75
d'Alembert, Jean Le Rond 56
Dalton, Juan 67, 68, 84, 234, 236–237,**237**, 241
Daniell, Juan 128, 129, 149
energía oscura 235, 269, 294, 295, 304,**306–307**, 311
materia oscura 23, 235, 269,**302–305**, 311
nebulosas oscuras 303
estrellas oscuras 286–287
almacenamiento de datos**157**
Davenport, Tomás 137
Davidson, Roberto 136
Davisson, Clinton 214
Davy, Humphry 139
de Broglie, Luis 206, 212, 214,**215**, 218, 220 de Forest, Lee 153
de Groot, Jan Cornets 34
de la Tour, Charles Cagniard 101
de Vaucouleurs, Gérard 290
decoherencia 231
Demócrito 66, 68–70,**69**, 71, 236 Descartes, René 28, 37, 42, 43, 56, 176, 280 deuterio 265, 284, 300
Alemán, David 207, 228,**231**
Dewar, James 100
Dhamakirti 70
minerales dicroicos 187
difracción 163,**180–183**
revolución digital 153
diodos 152, 153, 253 Diofanto de Alejandría 28 enlaces dipolo-dipolo 102
Dirac, Pablo 31, 159, 219, 224, 234,**246**, 260, 264
corriente continua (CC) electricidad 150, 153 distancia
medición**18-19**
en el espacio 291–293
ADN (ácido desoxirribonucleico)**23**
Dollond, Juan 174
dopaje 153, 154-155
Doppler, cristiano 163, 188-191,**189** efecto Doppler 163,**188-191**, 200 experimento de doble rendija 178, 187, 206, 212, 213, 215
Drebbel, Cornelis 174
Drever, Ronald 313–314
du Bois-Reymond, Emil 156
du Châtelet, Émilie 17,**54**, 86, 87, 89, 96 du Fay, Charles François 125
Dudgeon, Ricardo 36
Dussik, Karl 200
dinamos 140–141, 149–150

mi

electricidad, carga eléctrica 120–121,**124-127**, 131
Tierra
edad de 97 a 98 años
circunferencia 19, 272
energía 97
geocentrismo 22, 23, 48, 176, 270–273, 298
gravedad 50
magnetismo 122–123, 134
órbita del sol 189 rotación
sobre el eje 53 esférico 268, 272, 273, 280 ecolocalización 200, 201
eclipses 269, 270, 271, 272, 280, 303 Eddington, Arthur 265, 269, 280, 284,**285**, 302, 303, 304
Edison, Tomás 121, 148-151,**151** Egipto, antiguo 16, 18–19, 21, 26, 273 Einstein, Albert 13, 31, 98, 141, 211, 224,**279**, 282, 311
teoría atómica 236
Movimiento browniano 71, 106, 107, 110, 111, 237
constante cosmológica 294, 295, 299, 306, 307
principio de equivalencia**281**
teoría general de la relatividad 42, 44, 45, 48, 51, 269, 274, 280, 281, 287, 294, 298, 299, 303, 308, 309, 311, 312, 313
luz 198, 220, 275
Equivalencia masa-energía 55, 249, 279, 284, 285
efecto fotoeléctrico 114, 206, 209–210, 214
entrelazamiento cuántico 222–223, 231
teoría especial de la relatividad 48, 51, 144, 146, 147, 179, 219, 222, 223, 260, 268–269, 274, **276–279**, 281, 284, 287 Ekimov, Alexey 230

módulo elástico 72, 75
elasticidad 66, 73, 74, 75
electricidad 120–121
corriente eléctrica 121,**130-133**, 140, 141, 149, 153
campos eléctricos 127, 128, 132, 145–147, 149, 155, 156, 159, 163, 193, 210, 213, 244, 254
motor electrico**136-137**, 139 potencial eléctrico**128–129**, 131, 137, 156 vehículos eléctricos 141
resistencia eléctrica 131, 132-133
generando**87**, 121,**148-151**
electrodinámica 137
electrólisis 126
electrolitos 131
electromagnetismo 13, 121
descubrimiento de**134-135**, 137 campos electromagnéticos 147, 224–225, 254, 260 inducción electromagnética**138-141**, 144-145, 149, 193-194
radiación electromagnética 114, 115, 116, 141, 194, 195, 198, 202, 208
espectro electromagnético 163, 192,**194–195**, 209
ondas electromagnéticas 132, 138, 144, 147, 179, 187, 210, 213–214, 276, 277
fuerza fundamental 127, 159, 235, 247, 256, 257, 258, 259, 261, 262, 300, 308, 309, 310
teoría cuántica 224, 260
microscopios electrónicos 229–230
neutrinos electrónicos 257, 261
electrónica**152–155**
electrones
bonos 102
rayos catódicos 195
Cooper pares 228
descubrimiento de**126-127**, 152–153, 198, 234, 240, 242, 256
energía eléctrica 121, 133, 134, 140, 141
electrónica**152–155**
libre 151, 154, 300
desintegración nuclear 258, 259 fusión nuclear 251
órbitas 198–199, 216–217, 218, 231, 234, 241
teoría de partículas 209–211, 212–215, 218, 221, 224, 242–243, 257, 309
girar 157
estado de superposición 230-231
teoría de supercuerdas 310
electroscopios 123, 125
descarga electrostática**125**
fuerza electrodébil 224, 225, 258
elementos
básico 68–69, 70
combinación de 67, 237 formación de 71, 236, 237 líneas de emisión 180, 197–198, 199 Empédocles 176

empirismo 21-22
energía**66–67**
concepto de 88, 96
conservación de**55**, 66, 86, 87, 88, 89, 109, 258
conversión de**87–88**, 96 motores térmicos**90–93**
calor y transferencias**80–81** interno**88–89**
cinético**54**, 57, 87, 137, 254, 279
leyes de la termodinámica 67, 86,**88–89**,**96–99**, 110
equivalencia masa-energía 279, 284
y movimiento**56–57**
potencial**54**, 57, 86, 87, 89
radiación térmica**114-117**
cuantos de energía**208-211**
transferencia de energía 96
Englert, Francisco 262
entrelazamiento, cuántico 207,**222–223**, 228, 231, 311
entropía 67, 89, 96,**98–99**, 111
Epicuro 68, 70, 71
epiciclos 271

principio de equivalencia
281 Eratóstenes 19, 272
hipótesis ergódica 109
Erlanger, José**156**
velocidad de escape 289
Essen, Luis 38, 229
Euclides 16,**26**, 27–28, 30, 162, 168, 280 Euler,
Leonhard 17, 29, 52,**53**, 57, 74, 75, 76,
77, 79
evaporación 101, 102
horizontes de sucesos 287, 288, 289
Everett, Hugh 220
principio de exclusión 206, 217
experimentos 12, 20, 21, 23, 66

F

Fahrenheit, Daniel 80,**319** cuerpos
que caen 17,**32–35**, 49, 50 Efecto
Faraday 147, 187
Faraday, Michael 101, 131,**139**, 141, 197, 277
dinamos 140–141, 149
motor eléctrico 136, 138, 139 electricidad 124, 126, 127,
128 inducción electromagnética 121, 136, 144–145, 146
electromagnetismo 121, 134,**138-141**, 148, 187 campos
magnéticos 121, 147, 148

Ley de Faraday 146, 149 Ferdinando II de'
Medici 80 Fermat, Pierre de 29, 57, 162, 168,
169 Fermi, Enrique 235, 242, 248–250,**251**,
258 fermiones 257, 309, 310, 311

ferromagnetismo 123
Fert, Alberto**157**, 158
Fessenden, Reginald 192
Diagramas de Feynman 225
Feynman, Ricardo 147, 158, 207, 215, 222, 224,
225, 228, 230–231, 260
Fitch, Val 264
Fizeau, Armand 190
Fizeau, Hipólito 275
Fleming, John Ambrose 140, 152, 153
fluidos 36, 66,**76–79**
dinámica de fluidos aplicada**79** cambios
de estado y bonos**100-103**
fluorescencia**196–197**
portadores de fuerza 224, 235,**258–259**, 262, 309, 311
campos de fuerza 145–146
efectivo
igual acción-reacción 45
fluidos**76–79**
fundamentales 127, 159, 225, 235, 245, 247, 259,
261, 262, 300, 309, 310
y movimiento 43, 44, 45 estirando
y apretando**72–75**
*ver también*electromagnetismo; fricción; gravedad;
magnetismo; fuerza nuclear fuerte; fuerza
nuclear débil
Ford, Kent 303–304, 305
combustibles fósiles 67, 87,
151 Foucault, Léon 174, 275
Fourier, Joseph 52, 133
Frahm, Hermann 52
marcos de referencia 26, 51, 274, 277, 278, 282–283
Franklin, Benjamin 120, 124, 125
Franklin, Rosalinda 23
Fraunhofer, Joseph von 183, 216,**320** Líneas
Fraunhofer 183, 190, 216 energía libre 96

caída libre**32–35**, 50
frecuencia 116, 117, 153, 164, 165, 188, 189, 190,
199, 208, 210, 228, 230
Fresnel, Augustin-Jean 163, 168, 179, 180,
181–183,**182**, 187
fricción 42, 43, 44, 45, 87
Friedel, Georges 184
Friedmann, Alejandro 191, 294–295,**295**

GRAMO

galaxias 269, 270, 289,**290–293**, 294, 295, 298, 299,
300, 301, 302, 303–304, 307
Galfard, Christophe 218
Galileo, Galileo 12, 22, 23,**33**, 43, 72, 83, 164
cuerpos que caen 16,**32–35**, 42, 49, 50,
281 péndulos 17, 38–39, 52
relatividad 268, 274, 276–277, 281
velocidad de la luz 175
telescopios y espacio 48–49, 162, 172, 173,
268, 271, 272, 273, 290
termoscopios 80, 81
Galileo, Vincenzo 167
Galois, Évariste 30-31
Galvani, Luigi 128, 129, 156
galvanómetros 139, 140
radiación gamma 163, 195, 202, 234, 239, 243,
253, 284
Gamow, George 252-253, 299,**322**
gases 70, 71, 76, 78
cambios de estado y bonos 100–103
combinación de 85
fuerzas de atracción 102–103
leyes de los gases 66–67,**82–85**,
100 teoría cinética**79**, 85
licuefacción 100
Gassendi, Pierre 68, 70–71
Gasser, Herbert Spencer**156**
Gauss, Carl Friedrich 61–62, 144, 146, 280
Gay-Lussac, Joseph 66, 67, 82, 83, 84,**85**
Geiger, Hans 198, 234, 240, 243,**321**
Geissler, Enrique 197
Gell-Mann, Murray 235, 247, 256–257,**257**
generadores, eléctricos 138, 141, 149
geocentrismo 22, 23, 48–49, 176,**270–273**
geometría 27–28, 29
Georgi, Howard 159
energía geotérmica 151
Gerlach, Walter 206
Germán, Sofía**319–320**
germanio 154, 155
Gianotti, Fabiola**323**
Magnetorresistencia gigante (GMR) 157, 158
Gibbs, Josiah 96
Gibbs, Willard 106, 111
Gilbert, Guillermo 120, 122,**123**, 134, 136
Glashow, Sheldon 159, 224, 235, 262, 311
gluones 225, 247, 255, 257, 300
Goeppert-Meyer, María 217,**322**
Gordon, James 141
Goudsmit, Samuel 157
Navegación GPS 191, 228, 229, 282
gramos, Zenobe 149
Gran Teoría Unificada (GUT) 159, 310
campos gravitacionales 269, 287, 311
lentes gravitacionales 303, 304
masa gravitacional 287, 303 ondas
gravitacionales 274, 305,**312–315** gravitones
309, 311
gravedad**32–35**
principios de equivalencia 281 fuerza
fundamental 159, 225, 301
relatividad general 30
leyes de**46–51**
teoría de cuerdas 308–311
y universo 294, 295, 300, 301, 302–304, 307 y
velocidad 42
Gray, Esteban 130-131
Verde, Jorge 128
Verde, Miguel 310
Gregorio, Santiago 183
Gribbin, Juan 210
Grimaldi, Francesco Maria 32, 35, 49, 180–181, 182
Gross, David 310
Grünberg, Peter**157**, 158
Guericke, Otto von 66, 91
Guralnik, Gerald 262
Guth, Alan 300,**323**

h

Hafele, José 282
Hagen, C. Richard 262
Hahn, Otto 249
vida media 239
Hall, Chester Moore 174 El
cometa Halley 271
Hamilton, William Rowan 42, 54, 56, 57
unidades de disco duro (HDD) 157
movimiento armónico**52–53**
armónicos 166
Harrison, Juan 38,**39**
Hau, Lene 79
Hawking, Stephen 287, 289,**323**
Partículas de Hawking 289
calor
y color 117
conservación de energía 55
disipación 98, 99
entropía 98–99
Calentamiento en julios 133
leyes de la termodinámica 86,**88–89**,**96–
99** y luz 114–115
y movimiento**90–93**, 107, 114 y
temperatura 80, 86 *ver también*
teoría de la muerte por calor de
energía cinética 98
energía térmica 67,**87**, 93, 99, 114, 133, 249, 250
motores térmicos 67,**90–93**, 96, 97, 99 flujo de calor
96–97, 110
transferencia de calor**80–81**, 89,
114 cuerpos celestes**270–271**
Heaviside, Oliver 144
Heisenberg, Werner 37, 207, 218–219, 220–221,
221, 246, 278, 311
heliocentrismo 22, 23, 33, 42, 48–49, 268, 271,
273, 290
Helmholtz, Hermann von 55, 86, 87, 88, 89, 96, 193
Henlein, Peter 38
Enrique, José 135, 136, 140
Heráclito 68
Herapath, Juan 82, 106, 107
Héroe de Alejandría 90, 91, 162, 168, 169 Herschel,
William 114, 163, 192-193, 202,**319** Hertz, Enrique
144, 147, 192-194,**193**, 202, 210 Hertzsprung, Ejnar
292
Hess, Víctor 234, 244, 245
Hewish, Antony 203
Higgs, Pedro 262-263,**263**
Bosón de Higgs 225, 235, 257,**262–263**, 308, 309,
310, 311
Campo de Higgs 262, 263, 309,
310 Hiparco 270, 271
Hipaso 27
Hiroshima 251
Hodgkin, Alan 156
Hodgkin, Dorothy Pata de Cuervo**322**

Hooft, Gerard 't**159**
Hooke, Robert 51,**73**
gravedad 49
luz 162–163, 177, 178, 180, 181
microscopios 162, 174
resortes 66,**72–75**
tiempo 38, 39, 72, 73
Hoyle, Fred 299,**323**
Hubble, Edwin 191, 269, 270, 290, 292,**293**, 294, 295, 298, 299, 306
Huggins, William y Margaret 190
Hulse, Russell 269, 313
Hund, Federico 229
Huxley, Andrés 156
Huygens, Christian
luz 147, 163, 169, 177–178, 179, 181, 182, 183, 185
impulso 37
hora 16, 19,**38–39**, 52, 73
hidráulica**36**
hidroelectricidad 151
enlaces de hidrógeno 102-103
pilas de combustible de hidrógeno
151 presión hidrostática 78 hipótesis
20, 21, 22

I

Ibn al-Haytham, Hasan (Alhazen) 12, 22, 30, 176,**318**
Ibn Sahl 12, 162, 168, 169 Iijima, Sumio**323**

de inducción, electromagnética**138-141**, 144–145, 149, 193–194
anillos de inducción 139–
140 carga inductiva**141**
Revolución Industrial 13, 66, 74, 81, 86, 90, 148
inercia 43, 44, 53, 56
marcos de referencia inerciales 274, 277
radiación infrarroja 81, 114, 117, 163, 193, 194, 202
Ingenhousz, enero 80, 81, 96
aisladores 131, 154
circuitos integrados (CI) 152, 155, 158
interferencia, difracción y**181–183**
interferometría 275, 312, 314, 315
motores de combustión interna 90
energía interna**88–89**
centelleo interplanetario (IPS) 203
ionización 125, 234, 245
iones 129, 131, 149, 156, 244, 245
IPK (kilogramo prototipo internacional) 60,**61**, 62, 63
Acuerdo ITER 265

JK

Jacobi, Moritz von 136
Jansky, Karl 202
Vaqueros, James 117, 209 Joliot-
Curie, Frédéric 243, 253 Joliot-
Curie, Irène 243, 253,**322** Jordán,
Pascual 218
Josephson, Brian 228
Julio, James Prescott 17,**55**, 67, 86, 87–88, 89, 108, 114, 130
Júpiter 22, 23, 48–49, 268, 272, 273 K-
mesones 264
Kant, Emanuel 35
kaones 256, 264
Kapitsa, Piotr 79, 228
Keating, Richard 282
Declaración de Kelvin-Planck 99
Kepler, Johannes 31, 42, 48–49, 173, 209, 272, 273, 281,**318**
Kibble, Brian 60, 62,**63**
Croquetas, Tom 262
Kilby, Jack 152, 158
energía cinética 17,**54**, 57, 67, 87, 107, 137, 254, 279
teoría cinética de los gases 67, 74, 77,**78**, 79, 85, 106–110, 110, 145
Kirchhoff, Gustav 72, 114, 115-117,**115**, 130, 180, 190, 193, 197, 216
Klein, Óscar 308
Kleist, Georg von 120, 128
Knoll, Max 172
Köhler, agosto de 172
Koshiba, Masatoshi**261**

L

Ladenburg, Rudolph W. 199 Lagrange,
Joseph-Louis 17, 56,**57**, 146 Cambio de
cordero 260
bariones lambda 245
Tierra, Edwin H. 184
Landau, Lev 264
Langevin, Paul 200,**201**, 282–283,**283**
Langsdorf, Alexander 244 Laplace,
Pierre-Simon 63, 286,**319** láseres 199,
230, 314, 315 calor latente 81

latitud 39
Laue, Max von 195
Lauterbur, Paul 230
Le Verrier, Urbano 48
Leavitt, Henrietta Swan 290, 291–292,**293**
Lee, Tsung-Dao 259
Leibniz, Gottfried 26, 28, 29, 42–45,**42**, 54, 88, 169
Lemaître, Georges 288, 298–299,**298** contracción de longitud 283
Lenoir, Étienne 90
lentes 172–175, 177
Lenz, Emil 140
leptones 257, 309
Leucipo 66, 69, 70, 236
Lewis, Gilbert 208
levantar 76, 78
luz 162–163
flexión 176, 177, 269, 280, 281, 287, 303
difracción e interferencia**180–183** Efecto
Doppler y corrimiento al rojo**188-191**
ecolocalización**200–201**
teoría electromagnética de 115, 144,**147**, 260
ondas electromagnéticas**192–195** enfoque **170-175**
de los átomos**196–199**, 217
y calor 114–115
naturaleza de 212
polarización**184–187**
reflexión y refracción 22, 162-163,**168–169**, 172, 176–177
viendo más allá**202-203**
velocidad de 147, 268, 274,**275**, 277–278, 279, 282, 283
teorías de ondas y partículas**212–215**, 218 bombillas 133

cuantos de luz 210, 211
ondas de luz 163,**176–179**, 180–199, 212–215, 287, 312
relámpago 125, 127
Lilienfeld, Julio 152
aceleradores lineales (linacs) 254
Lippershey, Hans 173
Lippmann, Gabriel 201
licuefacción 100, 103
líquidos 36, 70, 71, 76, 100–103
Lobachevsky, Nikolai 30
imanes 120, 122–123
Lomonosov, Mikhail 107
Bonos de dispersión de Londres 102, 103 longitud 39, 72
Lorentz, Hendrik 144,**274**
Lorenz, Eduardo 111
Lovelace, Ada 29
Lovell, Bernard 202
Lucrecio 100, 176, 212

METRO

Teoría M 308
Mach, Ernst 109, 110, 111,**320**
macroestados 109
Nubes de Magallanes 261, 291, 292 campos magnéticos 53, 121, 127, 132, 157, 246
dinamos 141, 149
electroimanes 134-135
campos de fuerza 144–147
inducción 138–140
luz 163, 185, 187, 192, 193, 213
efecto motor 136–137
Escáneres de resonancia magnética 230
fusión nuclear 251, 265
sol 203
superconductores 228
inducción magnética 254
monopolos magnéticos**159**
magnetismo 120-121,**122-123**
imanes
haciendo**134-135**
aceleradores de partículas
254 aumentos**172-175**
Malus, Étienne-Louis 184–187,**186**
Proyecto Manhattan 225,**250–251**, 259
Mansfield, Pedro 230
Marconi, Guglielmo 192
cronómetros marinos 38,**39**
Marsden, Ernest 198, 234, 240
masa
leyes de la gravedad 51, 281 leyes del movimiento 43, 44–45, 49 equivalencia masa-energía 55, 279, 284 y velocidad 37, 44, 54, 88, 214 relaciones de masa 71, 236, 237

estrellas masivas 287, 288
materiales, fuerza de 66, 74, 75
matemáticas 16, 17,**24–31**
mecánica matricial 207,**218–219**
asunto**66**, 235
Gran explosión 300
cambios de estado y bonos 71,**100-103**
fluidos**76–79**
leyes de los gases**82–85**
asimetría materia-antimateria**264**
modelos de**68–71**, 196 estiramientos y contracciones 74–75 visibles 304

ondas de materia 214
aniquilación materia-antimateria 71
Maupertuis, Pierre-Louis 56
Maxwell, James Clerk 30, 60, 103, 137,**145**
electromagnetismo 13, 56, 114, 121, 138, 141, **144-147**, 159, 192–194, 213, 224, 260, 276, 277 teoría cinética de los gases 76, 79, 85, 106, 108, 110 modelo ligero 163, 179, 187, 192–194, 213, 260 Distribución de Maxwell-Boltzmann 110
Mayer, Julius von 55, 86, 87, 89, 96
medidas**16-17**
distancia**18-19**

Unidades SI y constantes físicas**60–63** en el espacio 291–293
velocidad de la luz 147, 275
temperatura 80
tiempo 17,**38–39**
mecánica, clásica 48, 51, 57
megaverso 310
efecto Meissner 228
Meitner, Lisa 242, 248,**249–250**
Mercurio 48
Mersenne, Marín 164
mesones 235, 247, 256, 264 Más desordenado 87 289
Messier, Carlos 270
enlaces metálicos 74
sistema métrico 17, 18, 19, 60–61
metrología 17, 62
Michell, Juan 286–287, 289
Michelson, Alberto 147, 268,**275**
microprocesadores 152, 155
microscopios 162, 172, 174–175
microestados 109
microondas 147, 194, 254
millas 19
Vía Láctea 202, 203, 269, 270, 286, 289, 290, 291, 292, 293
Miller, William Allen 190 Millikan, Robert 124, 127, 211,**321** Minkowski, Hermann 269, 276,**280** Mirkin, Chad 121, 158 universo espejo 264

espejos 162, 172, 174 Misener, Don 79, 228 enlaces moleculares**102-103**
movimiento molecular 79,**108**
Moletti, Giuseppe 32, 33
impulso 17,**37**, 54, 87
Monardes, Nicolás 196
monopolos, magnéticos**159**
Luna 270, 271, 272
gravedad 50
aterrizajes 35, 49
órbita alrededor de la Tierra 48, 281 Moore, Gordon**158**
Morley, Eduardo 268,**275**
movimiento
paradoja de la dicotomía 27
energía y**54**,**55**,**56–57**, 87
cuerpos cayendo**32–35**
armónico**52–53**
calor y**90–93**, 107, 114
hidráulica**36**
leyes de la gravedad**46–51**
leyes del 12, 17,**40–45**, 52, 53, 54, 56, 57, 108, 110, 276, 277, 278, 298
midiendo 17
impulso**37**, 87 relatividad**274**, **276–279** velocidad de la luz **275** motores, electricos **136-137**, 139 Mouton, Gabriel 17
Escáneres de resonancia magnética 228, 230 neutrinos muónicos 257, 261 muones 235, 245, 247, 257
música 52, 162,**164-167**

norte

Nagaoka, Hantaro 241
Nagasaki 251
Nakano, Tadao 256
Nambu, Yoichiro 262, 309–310
nanoelectrónica 121,**158**
nanopartículas 230
Navier, Claude-Louis 72, 79
nebulosas 115, 191, 270, 271, 292
números negativos 26, 29
células nerviosas 156
oscilación de neutrinos 261 neutrinos 235, 257, 258–259,**261** estrellas de neutrones 203, 268, 287, 312, 313, 315 neutrones 216, 225, 234, 235, 243, 247, 248, 250, 255, 256, 257, 258, 259, 285, 300, 309
Newcomen, Thomas 81, 90, 91 Newton, Isaac**51**, 106, 107, 109
átomos 66, 71,
100 cálculo 26, 29
fluidos 76, 78, 79
leyes de la gravedad 32,**48–51**, 73, 126, 281, 302 leyes del movimiento 12, 17, 37,**42–45**, 52, 53, 54, 56, 57, 108, 110, 274, 276, 277, 278, 298
luz 163, 169, 177, 180, 181, 183, 185, 186, 192, 206, 212, 213, 216
telescopio 174
visión del universo 22, 31, 99, 107
líquidos newtonianos 78
Nielsen, Holger 310
Nierste, Ulrich 264
Nishijima, Kazuhiko 256
Noddack, Ida 249
Noether, Emmy 31,**321**
novas 292
Noyce, Robert 152
desintegración nuclear 238, 239, 258–259 fisión nuclear 242,**249–251**, 252, 265, 285 fusión nuclear **251**, 285
en estrellas 261,**265**,
301 física nuclear 234–235
portadores de fuerza**258–259**
bombas nucleares y energía**248–251**
fusión nuclear en estrellas**265** rayos nucleares**238–239**
energía nuclear 148, 151, 195, 235, 247,**248–251**, 265, 284
reacciones nucleares 285
residuos nucleares 265
armas nucleares 235, 248,**250–251**, 265, 284, 285
nucleones 247
núcleo, atómico 234–235,**240–241**
creación de los primeros 300 descubrimiento de 148, 198, 241 electrones órbita 216–217, 240, 241 portadores de fuerza 258–259

modelo de 257
fisión y fusión nuclear 249, 250, 251, 252, 265
aceleradores de partículas 253
partículas subatómicas 242–243, 309
número**26–31**

OP

observaciones 21, 22, 23
Ohl, Russel 154
Ohm, Georg Simón 121, 130, 132-133,**132**
Olifante, Marcos 265
Onnes, Heike Kamerlingh 100, 121, 130, 228
Oppenheimer, Robert J. 250, 251, 288,**322**
órbitas
circular 271
electrones 198–199, 216–217, 218, 231, 234, 241
elípticos 48, 50
Oresme, Nicole 16, 34
Ørsted, Hans Christian 121, 122, 134,**135**, 136, 137, 138, 144
oscilaciones
electromagnetismo 193, 194, 213, 254
movimiento armónico 52–53
luz 163, 184, 185, 187, 213
neutrino 261
péndulos 17, 39
sonido 165, 166, 167, 201
P (paridad) simetría 264
Pais, Abraham 308
Papin, Denis 91
paradojas 27, 214, 220, 282–283
paralaje 291, 292
Parkin, Estuardo 157
Parry, Jack 38
Parsons, Carlos 148
aceleradores de partículas 127, 235, 247,**252–255**, 263, 285
física de partículas 127, 234–235
antimateria**246**
Teoría atómica**236–237**
Gran Teoría Unificada 159
Bosón de Higgs**262–263**
monopolos magnéticos 159
asimetría materia-antimateria**264**
neutrinos**261**
núcleo**240–241**
aceleradores de partículas**252–255** zoológico de partículas y quarks**256–257** Modelo estándar 31, 225, 235, 257, 261, 262, 263, 264, 308, 309, 310
teoria de las cuerdas**308–311**
fuerza potente**247**
partículas subatómicas 13,**242–245**
zoológico de partículas**256–257**
Pascal, Blas 17,**36**, 75, 76, 78, 82 Pauli, Wolfgang 206, 216,**217**, 235, 258
Pauling, Lino 23
Payne, Cecilia 50
Payne-Scott, Ruby**323**
péndulos 17, 38–39, 52
Penrose, Roger 288
Penzias, Arno 299, 301
Pepys, Samuel 73
Peregrinus, Petrus 122–123
Perkins, Jacob 90
Perlmutter, Saúl 306–307,**307**
Perrin, Jean Baptiste 71, 107
flogisto 107
fósforo 154
efecto fotoeléctrico 114, 179, 193, 206, 208, **209–210**, 211, 214, 216
fotolitografía 155, 158
fotones 179, 206, 208, 209, 211, 214, 215, 216, 220–221, 224, 230, 257, 260, 263, 300
células fotovoltaicas 151
constantes fisicas**60–63** Pickering, Edwin Charles 291, 293
piezoelectricidad**200–201** piones 247
Pirani, Félix 313
tono 162, 164–177, 188, 190 Pixii, Hippolyte 137, 141, 148, 149 Energía de Planck 311
Planck, Máx 13, 206,**211**, 220–221
radiación de cuerpo negro 67, 114, 117, 214
cuantos de energía 67, 179, 198,**208-211**
motores térmicos 99
Constante de Planck 62, 63, 199, 209, 214, 221
movimiento planetario 42, 48–49, 167,**270–273**
plasma 71, 251
Platón 12, 21, 70, 167
Platz, Reinhold 76
Podolski, Boris 220
Poincaré, Henri 312–313 Poisson, Siméon-Denis 128, 183
polarización 147, 163, 179, 180, 182, 183,**184–187**

polos magnéticos 123, 159
Polyakov, Alexander**159**
positrones 127, 234, 245
diferencia de potencial 129, 130, 131, 133, 138, 140
energía potencial**54**, 57, 86, 87, 89 Poder, Enrique 84

centrales eléctricas 121, 138, 141, 148, 150, 235, 248, 251
Preskill, John 159
presión**36**
aire 83–84
fluidos 66, 77, 78, 100-101
átomo primitivo 299
prismas 114, 177, 183, 187, 192, 213
probabilidad, entropía y 96, 111 ondas
de probabilidad 219, 229
Proclo 26, 30
protones 127, 225, 230, 234, 235, 243, 245, 247,
249, 251, 255, 256, 257, 258, 259, 265, 300, 309
aceleradores de partículas 252, 253, 254
Proust, José 236
Ptolomeo 22, 168, 268, 270,**271**, 272, 273
púlsares 163, 203, 312, 313
Pitágoras 26, 27, 162, 164-167,**167**, 272

QR

cuantos 67, 117, 179, 198, 206–207,**208-211**, 214, 216, 224 aplicaciones cuánticas**226-231** cromodinámica cuántica 260
computación cuántica 207, 222, 223, 228,**230–231**
criptografía cuántica 223 puntos cuánticos 228,**230**

electrodinámica cuántica (QED) 225,**260** entrelazamiento cuántico 207,**222–223**, 228, 231, 311 teoría cuántica de campos**224–225** escala de gravedad cuántica 310
imágenes cuánticas 229–230 saltos cuánticos 216–217

mecánica cuántica 70, 117, 127, 157, 218–219,
222, 224, 241, 243, 260, 309, 311 números
cuánticos**216–217** partículas cuánticas 220–221, 224, 229 física cuántica 206–207, 208, 212, 221, 228
cuantos de energía**208-211**
El principio de incertidumbre de Heisenberg **220–221** matrices y ondas**218–219** aplicaciones cuánticas**226-231** entrelazamiento cuántico **222–223** teoría cuántica de campos**224–225** números cuánticos**216–217** dualidad onda-partícula**212–215** espín cuántico 206, 230

teoría cuántica 207, 211, 214, 220, 223, 231,
260, 295, 311
túnel cuántico 229, 253
plasma quark-gluón 255, 300
quarks 224, 225, 235, 247, 255,**256–257**, 259, 262,
300, 309, 310
cúbits 228, 230–231
radares 147, 191
calor radiante 81
radiación 234–235
cuerpo negro 67, 114, 115, 116, 117, 208–209
cósmico 244, 245
fondo cósmico de microondas 298, 299–301,
306, 307
electromagnético 114, 115, 116, 141, 194, 195,
198, 202, 208
cuantos de energía 208–211
nuclear**238–239**
térmico**112-117**
ultravioleta 193
ondas de radiofrecuencia (RF) 254
radiotelescopios 202–203
ondas de radio 114, 141, 147, 163, 191, 192, 193,
194, 202, 230
desintegración beta radiactiva 71
radiactividad 98, 201,**238–239**, 248, 249, 251, 265, 285
arcoiris 187
Rankine, Guillermo 55, 86, 88,**89**, 96, 97, 98, 110
corrimiento al rojo**191**, 295, 299 Caña, Marcos 228

luz reflejada/refractada 22, 162–163,**168–169**, 172,
174, 186–187
Reines, Federico 235, 258, 259, 261
Reitze, David 314
relatividad 141, 268–269,**274**,**276–279**
Galileo 274, 276
teoría general de 42, 44, 45, 48, 51, 269, 274, 281,
287, 294, 298, 299, 303, 308, 309, 311, 312, 313
paradojas de especial**282–283**
teoría especial de 48, 51, 144, 146, 147, 179,
219, 222, 223, 260, 268–269, 274,**277–279**,
281, 284, 287
resistencia 121, 131, 132–133
Riccati, Giordano 75
Riccioli, Giovanni Battista 32, 35, 49
Richardson, Lewis Fry 200–201
Riemann, Bernhard 30
Riess, Adam 306, 307 regla
de la mano derecha 140
Rittenhouse, David 183
Ritter, Johann 193
Robinson, Ian 62
Röntgen, Wilhelm 192,**195**
Rosen, Natán 220
rotación 53
Rubin, Vera 302, 303–304,**305**
Ruska, Ernst 172
Rutherford, Ernesto 107, 234–235,**241**
modelo atómico 198,**242–243**
núcleo**240–241**, 248, 252, 253
radiación 234, 238, 239, 248
Rydberg, Johannes 198
Ryle, Martín 203

S

Saint-Victor, Abel Niepce de 238
Sakharov, Andrei**264**
Salam, Abdus 224, 235, 262
satélites 50–51, 53, 202, 210, 229
Savery, Thomas 91
Scheele, Carl 80, 81, 96
Schmidt, Brian 306, 307
Schrieffer, John 155, 228
Schrödinger, Edwin 56, 196, 207, 212, 218,
219, 220, 222
El gato de Schrödinger 218,**221**
Schuckert, Sigmund 148
Schuster, Arturo 246
Schwartz, Juan 310
Schwarzschild, Karl 269, 286, 287–288,**289**
Radio de Schwarzschild 287 Schwinger, Julián 225,**260**, 264 método científico 16,**20-23**

Revolución científica 16, 20, 22, 33, 42, 72, 268
Scott, David 32, 35, 49, 281
Sebastián, Suchitra 213
Seebeck, Thomas 152
semiconductores 152, 153, 154, 155, 229, 230
Shapley, Harlow 292, 293
capas, electrón 216, 217, 241, 243
Shen Kuo (Meng Xi Weng) 122
ondas de choque 110
Shockley, Guillermo 155
SI (*Sistema Internacional*) unidades 17, 18, 19, 60–63, 127
Siemens, Werner von 149
silicio 121, 153, 154, 155, 158
Simmons, Michelle Yvonne 228
singularidades 287, 288, 300, 311
Slipher, Walter 191
Smith, George E. 176
Smoluchowski, Marian von 106, 107, 110, 111
Snellius, Willebrord 162, 169
Snyder, Hartland 288
Sócrates 12, 21
Soddy, Federico 239
células solares 208
neutrinos solares 261
energía solar 87, 151
radiación solar 98
sistema solar, modelos de 22, 23, 42, 48–49, 176, 268,
270–273, 298
física del estado sólido 154
sólidos 70, 71, 100
sonar 201
sonido 162–163
música 162,**164-167**
piezoelectricidad y ultrasonido**200–201** ondas sonoras
162, 163, 164–167, 178, 188, 189, 200–201 espacio

distancia de medición en 291–293
efecto fotoeléctrico en**210**
relatividad 268–269, 274
y tiempo 43, 45, 268, 274, 277, 278–279, 280, 281
espacio-tiempo 269, 276, 280
agujeros negros y agujeros de gusano**286–289**
curvatura 269, 274,**280**, 281, 287, 294, 302, 303,
304, 308, 313
dimensiones de 269, 280, 308, 310, 311
ondas gravitacionales**312–315** universo
espejo 264
Spallanzani, Lazzaro 200
espectrografía 190, 191
líneas espectrales 183, 190, 199, 217
galaxias espirales 304
nebulosas espirales 191, 292
manantiales 72–74
apretando**72–75**
SQUIDS (interferencia cuántica superconductora)
dispositivos) 228
St-Venant, Jean Claude 72
Modelo estándar 31, 225, 235, 257, 261, 262, 263,
264, 308, 309, 310
Stanley, William 150–151
estrellas 270–271, 312
agujeros negros y agujeros de gusano**286–289**
color 163,**188-190**
distancia de la Tierra 291–293
evolución de**284–285**, 301
fusión nuclear**265**
temperaturas**117**
ver también galaxias; movimiento planetario; estado
del universo, cambios de**100-103** electricidad estática
123, 127, 146, 254 mecánica estadística**104-111**
termodinámica estadística 109-110

máquinas de vapor 66, 80, 81, 86, 90–93, 96, 106, 149
agujeros negros estelares 314
Stenger, Víctor J. 211
Stern, Otto 206
Stevin, Simon 18, 19, 34 Stewart,
Balfour 115–116 Stokes, George
Gabriel 79, 197 Stonehenge 270

Stoney, George J. 124, 126, 242
cepa 74, 75
extrañeza 235, 256
Strassmann, Fritz 249

estrés 74, 75, 78
estiramiento**72–75**
teoria de las cuerdas**308–311**
fuerza nuclear fuerte 159, 225, 235,**247**, 256, 257, 259, 260, 300, 309, 310 Strutt, John (Lord Rayleigh) 117, 209 Sturgeon, William 135, 137, 138
partículas subatómicas 13, 71, 126, 198, 206, 224, 234, **242–247**, 253,**256–257**
sol
energía 261, 285
gravedad 49
heliocentrismo 22, 48–49, 268, 270–273, 290
campo magnético 203
posición de 292, 293
estrellas supercalientes 199
Super-Kamiokande 261, 311
superconductividad 103, 121, 132, 155,**228**
superfluidos 79,**228–229**
agujeros negros supermasivos 202, 203,**289**, 315
supernovas 261, 288, 301, 306–307
superposición 220, 221, 311
teoría de supercuerdas 311
supersimetría 309,**310–311**
tensión superficial 102
puentes colgantes 75
Susskind, Leonard 279, 308, 309,**310**
simetría rompiendo 262
aceleradores sincrotrón 254
Szilard, Leo**322**

t

taquiones 310
neutrinos tau 257, 261
tau 257
Taylor, José 269, 313
telescopios 13, 115, 162, 172–174, 191, 202–203, 268, 289, 292, 301, 306
temperatura
cambios de estado 101, 102 y calor 80, 86
y resistencia 132
estrellas**117**
y radiación térmica 114–115
campos de temperatura 145
resistencia a la tracción**75**
Tesla, Nikola 150,**320**
Tevatrón 255
Tales de Mileto 12, 20, 21, 27, 120, 122, 124
Teoría del Todo 311
Radiación termal**112-117**
termodinámica 67, 91–92, 93, 111
leyes del 67, 86,**88–89**,**96–99**, 110
estadístico 109–110
efecto termoeléctrico 152
termómetros 80
Thompson, Benjamín (Conde Rumford) 54, 55, 66, 86, 87, 114
Thomson, Jorge 214
Thomson, JJ 124, 145, 153,**320–321**
modelo atómico**242–243**
descubre el electrón**126-127**, 198, 208, 212, 218, 234, 236, 238, 240,**242**
Thomson, William (Lord Kelvin)**320**
cero absoluto 84, 107, 114
magnetorresistencia 157
termodinámica 67, 88, 89, 96–99, 108, 110
Thorne, Kip 312, 314,**315** timbre 165

tiempo
relojes atómicos**229**
dilatación 278, 282
mide 17,**38–39**, 52 relatividad 268–269, 274, 276–279 y espacio 43, 45, 277, 278–279, 280, 281 flecha termodinámica de 67, **99** reactores tokamak 251, 265 Tomonaga, Shin'ichirō 225,**260** Tompion, Tomás 73

quarks superiores 235, 255, 256, 257, 262 pares de torsión 137
Torricelli, Evangelista 36, 77, 82, 83, 84, 106,**319**
torsión 126
Townes, Carlos 196
Townley, Richard 84
transductores 201
transformadores 139, 150–151 transistores 152, 153, 154, 155, 158, 229 Treiman, Sam 308
triodos 153
turbinas
vapor 141, 151
viento, olas y mareas 151
Turing, Alan 231
paradoja de los gemelos**282–283**

UVW

Uhlenbeck, George 157
ultrasonido**200–201**
catástrofe ultravioleta 117, 209
luz ultravioleta 117, 163, 179, 193, 195, 197, 208, 209, 210, 238, 301
principio de incertidumbre 207, 218–219,**220–221**, 222
universo 268–269
expansión acelerada 188, 294, 298
Big Bang**296–301**
agujeros negros y agujeros de gusano**286–289**
curvo 280
espacio-tiempo curvado**280**
energía oscura**306–307**
materia oscura**302–305**
descubriendo galaxias 269,**290–293**
energía de**97–98**
expandiendo 191, 269, 293,**294–295**, 298, 299, 301, 303, 306–307, 311
futuro de 98, 99, 289,**294–295**, 301, 306
ondas gravitacionales**312–315** cuerpos celestiales**270–271** Campo de Higgs 262-263

modelos de 271,**272–273**, 299–300
orígenes de 255, 269,**298–301** forma de 295
Modelo estándar 308–309, 310
estático 268,**294–295**
teoria de las cuerdas**308–311**
Uranio 238–239, 249, 250
Urey, Harold C. 265
tubos de vacío 152, 153, 154, 155, 195, 242
vacíos
leyes de los gases 66, 83
motores térmicos 91
luz en 274, 275, 277
bandas de valencia 154
válvulas 153
van der Waals, Johannes Diderik 67, 100, 102-103,**103**
van Leeuwenhoek, Antonie 172,**175** van Musschenbroek, Pieter 120, 128 vaporización 101, 102

campos vectoriales 146
velocidad
constante 274, 277, 282
escapar 289
fluidos 66, 77
leyes del movimiento 42, 44, 45 y masa 37, 44, 54, 88, 214
impulso 17, 37
orbitales 50, 51
venus 49
Vesalio, Andreas 20, 22, 23
Viète, François 28
Vikingos 184
Villard, Paul 234, 238, 239
viscosidad 76, 78, 79
luz visible 114, 193, 194, 195, 197, 238
Vogel, Hermann Carl 190
actividad volcánica 97
Volta, Alejandro 120, 121, 128,**129**, 130, 131, 134, 149
Bosones W 235, 257, 258, 259, 262, 263
Wallis, John 17,**37**, 54 Walton, Ernest 253–254, 255 relojes 72–73

agua 100, 101, 103 Waterston, Juan 106, 107–108 Watson, Santiago 23
Watt, Santiago 66, 80,**81**, 86, 91
energía de las olas 151
dualidad onda-partícula 179, 206, 210,**212–215**, 220, 221, 229–230
función de onda 219, 220
fuerza nuclear débil 159, 224, 225, 235, 245, 256, 257, 258, 259, 262, 300, 308, 309, 310
pronósticos del tiempo**111**
Weinberg, Steven 224
Weiss, Pierre-Ernest 122
Weiss, Rainer 313–314, 315
Westinghouse, George 151
Wheeler, John 288
enanas blancas 287, 306, 307
Viena, Wilhelm 116
Salvaje, Juan 200
Wilkins, Juan 19
Wilson, Alan Herries 152
Wilson, Charles TR 244,**245**
Wilson, Robert 299, 301
WIMP (partículas masivas que interactúan débilmente) 23, 304–305
energía eólica 151
telegrafía inalámbrica 194
Witten, Edward 308
Wollaston, William Hyde 216
trabajo y energía 67, 88, 89, 96
agujeros de gusano 286,**288**
Wren, Cristóbal 37
Wu, Chien-Shiung 258,**259**
Wu Xing 69

XYZ

Difracción de rayos X 23, 214
Rayos X 114, 163, 195, 206, 208, 211, 234, 238, 239
Yang, Chen Ning 259
Joven, Tomás 54, 72, 88, 102,**179**
luz 163, 168, 176–179, 181–182, 186, 187, 192, Módulo 206, 212, 213, 215, 287**75**
Yukawa, Hideki 235,**247**
Bosones Z 235, 257, 258, 259, 262, 263
Zeilinger, Anton 222
Zenón de Elea 27
cero, concepto de 26, 28 Zwicky, Fritz 302,**303**

QUOTACIONES

Las siguientes citas principales se atribuyen a personas que no son la figura clave del tema relevante.

MEDICIÓN Y MOVIMIENTO

18 **El hombre es la medida de todas las cosas** Protágoras, filósofo griego

20 **Una pregunta prudente es la mitad de la sabiduría.** Francis Bacon, filósofo inglés

24 **todo es numero** Lema de los pitagóricos

32 **Los cuerpos no sufren más resistencia que la del aire.** Isaac Newton, matemático y físico inglés

38 **Las producciones más maravillosas de las artes mecánicas.** Mary L. Booth, periodista estadounidense

55 **La energía no se puede crear ni destruir.** Julius von Mayer, químico y físico alemán

58 **Debemos mirar a los cielos para la medida de la Tierra.** Jean Picard, astrónomo francés

ENERGÍA Y MATERIA

76 **Las diminutas partes de la materia están en rápido movimiento.** James Clerk Maxwell, físico escocés

80 **Buscando el secreto del fuego** Thomas Carlyle, filósofo escocés

86 **La energía del universo es constante.** Rudolf Clausius, físico y matemático alemán

100 **El fluido y su vapor se vuelven uno.** Michael Faraday, físico británico

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

124 **La atracción de la electricidad.** Joseph Priestley, filósofo y químico británico

128 **La energía potencial se convierte en movimiento palpable.** William Thomson (Lord Kelvin), físico irlandés-escocés

130 **Un impuesto a la energía eléctrica** Helen Czerski, física y oceanógrafa británica

134 **Cada metal tiene un poder determinado.** Alessandro Volta, físico y químico italiano

156 **Electricidad animal** Luigi Galvani, físico italiano

157 **Un descubrimiento científico totalmente inesperado** Comité del Premio Nobel 2007

158 **Una enciclopedia sobre la cabeza de un alfiler.** Richard Feynman, físico teórico estadounidense

SONIDO Y LUZ

170 **Un nuevo mundo visible** Robert Hooke, físico inglés

180 **Nunca se sabe que la luz se doblegue hacia la sombra.** isaac newton

196 **El lenguaje de los espectros es una verdadera música de las esferas.** Arnold Sommerfeld, físico teórico alemán

202 **Un gran eco fluctuante** Bernard Lovell, físico y radioastrónomo británico

EL MUNDO CUÁNTICO

208 **La energía de la luz se distribuye de forma discontinua en el espacio.** Albert Einstein, físico teórico nacido en Alemania

212 **No se comportan como nada que hayas visto jamás.** Richard Feynman

222 **Acción espeluznante a distancia** Albert Einstein

FÍSICA NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

238 **Una auténtica transformación de la materia** Ernest Rutherford, físico británico nacido en Nueva Zelanda

242 **Los ladrillos que componen los átomos.** JJ Thomson, físico británico

246 **Los opuestos pueden explotar** Peter David, escritor estadounidense

252 **Una ventana a la creación** Michio Kaku, físico estadounidense

260 **La naturaleza es absurda** Richard Feynman

261 **El misterio de los neutrinos desaparecidos** John N. Bahcall, astrofísico estadounidense

262 **creo que lo tenemos** Rolf-Dieter Heuer, físico de partículas alemán

LA RELATIVIDAD Y EL UNIVERSO

275 **El sol como estaba hace unos ocho minutos.** Richard Kurin, antropólogo estadounidense

281 **La gravedad es equivalente a la aceleración.** David Morin, académico y físico estadounidense

282 **¿Por qué el gemelo viajero es más joven?** Ronald C. Lasky, académico estadounidense

286 **Donde el espacio-tiempo simplemente termina** Abhay Ashtekar, físico teórico indio

294 **El futuro del universo** Stephen Hawking, cosmólogo británico

302 **La materia visible por sí sola no es suficiente** Lisa Randall, física teórica estadounidense

308 **Hilos en un tapiz** Sheldon Glashow, físico teórico estadounidense

312 **Ondas en el espacio-tiempo** Govert Schilling, escritor científico holandés

EXPRESIONES DE GRATITUD

Dorling Kindersley desea agradecer a Rose Blackett-Ord, Rishi Bryan, Daniel Byrne, Helen Fewster, Dharini Ganesh, Anita Kakar y Maisie Peppitt por su asistencia editorial; Mridushmita Bose, Mik Gates, Duncan Turner y Anjali Sachar por su asistencia en el diseño; Alexandra Beeden por la revisión; Helen Peters por la indexación; y Harish Aggarwal (diseñador senior de DTP), Priyanka Sharma (coordinadora editorial de chaquetas) y Saloni Singh (editora gerente de chaquetas).

CRÉDITOS DE LAS FOTOS

El editor desea agradecer a las siguientes personas su amable permiso para reproducir sus fotografías:

(Clave: a-arriba; b-abajo/abajo; c-centro; f-lejos; l-izquierda; r-derecha; t-arriba)

19 akg-imágenes: Rabatti & Domingie (tl).**21 imágenes falsas:** DEA / A. Dagli Orti (tr).**22 Colección de bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(tr). **23 Alamy Foto de stock:**Imágenes de la historia de la ciencia (bl).**26 Alamy Foto:** Fotografía AF (bl).**27 iStockfoto. es:**Fotos.com (br).**28 Alamy Foto:** Imágenes de la historia de la ciencia (b).**31 imágenes falsas:** Desfile Pictórico (tr). **33 Sueñostime.com:**Georgios Kollidas / Georgios (tr). **34 imágenes falsas:**De Agostini / G. Nimatallah (br). **39 Alamy Foto:**Archivos de imágenes del viento del norte (tl); Imágenes de la historia de la ciencia (br).**42 Alamy Foto:** Archivos de imágenes del viento del norte (bl).**45 Alamy Foto:**Mark Garlick / Biblioteca de fotografías científicas (br).**49 El Museo Metropolitano de Arte:**La colección Elisha Whittelsey, Fondo Elisha Whittelsey, 1959 (tl).**50 iStockphoto.com:**Iurii Buriak (clb). **51 Colección Bienvenida http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0/:**(licenciado en Derecho).**53 imágenes falsas:** Imágenes patrimoniales / Archivo Hulton (tr, antes de Cristo).**55 imágenes falsas:**Biblioteca de imágenes de ciencia y sociedad (cb).**57 Alamy Foto:**Asociación de imágenes de patrimonio Ltd (tr).**61 Oficina Internacional de Pesos y Medidas, BIPM:**(licenciado en Derecho).**Rex de Shutterstock:** Gianni Dagli Orti (tr).**63 Laboratorio Nacional de Física:** NPL Management Ltd (bl). **NIST:**Curt Suplee (tr).**69 Alamy Foto:**Mundo de archivo (tr); The Print Collector / Oxford Science Archive / Heritage Images (cla).**73 Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Oxford:**Pintura moderna de Rita Greer (tr). **74 Alamy Foto:** Imágenes de la historia de la ciencia (tl).**75 Alamy Foto:**François Roux (tl).**77 Alamy Foto:**Prensa pictórica Ltd (tr).**78 NOAA:**Libros raros y colecciones especiales: Hydrodynamica de Daniel Bernouli (bl). **81 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (bl). **Dreamstime.com:**Mishatc (tr).**83 Alamy Foto:** La colección Granger (br).**85 Alamy Foto:** Impresionar (tr); Imágenes de la historia de la ciencia (tl).**87 Pixabay:** Benita5/37 imágenes (cla).**88 Dorling Kindersley:** cortesía del blog de testigos expertos en ingeniería (bl).**89 Alamy Foto:**Colección Artokoloro Quint Lox Limited / liszt (tr).**91 Colección Bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(ocra).**92 Biblioteca de fotografías científicas:**JL Charmet (bl.).**96 imágenes falsas:** Bettmann (bl.).**97 imágenes falsas:**Imágenes de Stocktrek / Richard Roscoe (br).**98ESO:**(licenciado en Derecho).**99 imágenes falsas:**Alicia Llop (br).**103 Alamy Foto:** Colección de Historia y Arte (tr).**Dreamstime.com:**franco Nadalín (bl).**107 iStockphoto.com:**Danielle Kuck (br).**109 imágenes falsas:**Archivo Imagno / Hulton (bl). **110 SuperStock:** Fototeca Gilardi / Marka (tr).**111 Dreamstime.com:**Victor Zastol`skiy / Vicnt (bl).**115 imágenes falsas:**Biblioteca de imágenes de ciencia y sociedad (bl). **NASA:**Infrarrojo lejano: ESA / Herschel / PACS / SPIRE / Hill, Motte, Consorcio del Programa Clave HOBYS; Rayos X: ESA / XMM-Newton / EPIC / XMM-Newton-SOC / Boulanger (tl).**117 imágenes falsas:**Mark Garlick / Biblioteca de fotografías científicas (tr).**123 Colección Bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(tr).**125 Sueñostime.com:**Danielkmalloy (tr).**127 Alamy Foto:**Interfoto / Personalidades (bl).**129 Alamy Foto:**Prisma Archivo (a. C.). **Dreamstime.com:** Ovydyborets (antes de Cristo/antecedentes). **Colección de bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(tr). **132 imágenes falsas:**Biblioteca de imágenes de ciencia y sociedad (bl). **133 iStockphoto.com:** choness (antes de cristo).**135 Alamy Foto:**Archivo de imágenes históricas de Granger (tr); Archivo de Historia Mundial (tl).**137 Colección Bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(licenciado en Derecho).**139 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (tr).**145 imágenes falsas:**Corbis Histórico / Stefano Bianchetti (bl). **147 Alamy Foto:**Archivo de Historia Mundial (tr). **149 Alamy Foto:**Colección Everett Histórica (cla).**151 iStockphoto.com:**querbeet (antes de Cristo).**Colección de bienvenida http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0/:**(tr). **153 Alamy Foto:**Pictórica Press Ltd (cb).**155 Biblioteca de fotografías científicas:**Archivos Visuales Emilio Segre / Instituto Americano de Física (tl).**156 imágenes falsas:**Ken Kiefer 2 (antes de Cristo).**158 imágenes falsas:**Roger Ressmeyer / Corbis / VCG (br).**166 Sueñostime.com:** James Steidl (br).**167 Alamy Foto:**FLHC 80 (tl). **Colección de bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(tr).**169 Alamy Foto:**La colección Granger (bl). **Dejar caer:**Michael Heuser / @gum_meee (cra).**174 Biblioteca de fotografías científicas:**(tl).**175 imágenes falsas:**Biblioteca de imágenes de ciencia y sociedad (bc). **Colección de bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(tr).**177 imágenes falsas:**Biblioteca de fotografías científicas / David Parker (tl).**179 Alamy Foto:** Imágenes de historia de la ciencia / investigadores fotográficos (tl).**181 Alamy Foto:**Durk Gardenier (cra).**182 imágenes falsas:**Fototeca De Agostini (tl).**183 Unsplash:** Lanju Fotografía / @lanju_fotografie (tl).**185 iStockfoto. es:** Darunechka (br).**186 Colección Bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(licenciado en Derecho). **189 imágenes falsas:**Archivo Imagno / Hulton (tr).**191 NASA:**ESA, R. Ellis (Caltech) y el equipo HUDF 2012 (br).**193 Alamy Foto:** Imágenes de cola (cla).**195 Alamy Foto:** Archivo de Historia Mundial (tr).**197 Biblioteca de fotografías científicas:** Mark A. Schneider (cla).**199 Alamy Foto:**Fotos de archivo (tr).**201 Alamy Foto:**Colección Lordprice (tr).**Pixabay:**KatinkavomWolfenmond / 57 imágenes (bc). **203 Alamy Foto:**Geraint Lewis (bl.).**Biblioteca de fotografías científicas:**Instituto Max Planck de Radioastronomía (tr).**210 NASA:**(tl).**211 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (tr).**214 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (bl).**215 imágenes falsas:**imagen ullstein Dtl. (licenciado en Derecho).**216 imágenes falsas:**Enciclopedia Británica / Universal Images Group (br).**217 Biblioteca de fotografías científicas:** Archivos Visuales Emilio Segre / Instituto Americano de Física (tr).**219 imágenes falsas:**Bettmann (br).**221 Alamy Foto:**Pictórica Press Ltd (cla).**223 imágenes falsas:**Mark Garlick / Biblioteca de fotografías científicas (bc).

Biblioteca de fotografías científicas: Peter Menzel (tr.).**225 imágenes falsas:**Bettmann (bl.).**228 Biblioteca de fotografías científicas:** Patrick Gaillardin / Mira las ciencias (tc).**229 NIST:**GE Martí / JILA (cla).**230 Alamy Foto:**Ian Allenden (tl).**231 imágenes falsas:**Robert Wallis / Corbis (tr.).**237 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (bl).**Dorling Kindersley:**Museo de Ciencias, Londres (tr).**239 Alamy Foto:**El coleccionista de grabados / Imágenes patrimoniales (tr). **241 imágenes falsas:**Coleccionista de impresiones / Archivo Hulton (tr). **243 imágenes falsas:**Foto 12 / Grupo Universal Images (bl).**244 imágenes falsas:** Coleccionista de impresiones / Archivo Hulton (bl).**245 Biblioteca de fotografías científicas:**(tr).**249 Alamy Foto:**Colección Everett histórica (tr).**251 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (tl, tr).**255 © CERN:** Maximilien Brice (tc).**Biblioteca de fotografías científicas:**Archivos Visuales Emilio Segre / Instituto Americano de Física (bl). **257 imágenes falsas:**Bettmann (tr).**259 Alamy Foto:**Imágenes de la historia de la ciencia (bl).**Biblioteca de fotografías científicas:**CERN (tr.).**260 imágenes falsas:**El Asahi Shimbun (crb).**263 imágenes falsas:**Colin McPherson / Corbis Entertainment (tr).**Biblioteca de fotografías científicas:** David Parker (cla).**265 imágenes falsas:**EFDA-JET / Fototeca científica (cr).**270 Pixabay:**ciprianbogacs (br).**271 Alamy Foto:** Archivo GL (tr).**273 NASA:**JPL / DLR (ocra).**Colección de bienvenida http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/:**(licenciado en Derecho).**274 Alamy Foto:**Prisma Archivo (cr).**279 Alamy Foto:**Archivo de imágenes históricas de Granger (tr). **iStockphoto.com:**wodeweitu (bc).**283 imágenes falsas:** Keystone-Francia / Gamma-Keystone (tr).**285 Alamy Foto:**Fotos de archivo (tr).**NASA:**GSFC/SDO (bl). **289 NASA:**CXC / M. Weiss (bl). **Biblioteca de fotografías científicas:** Archivos Visuales Emilio Segre / Instituto Americano de Física (tr).**292 Alamy Foto:**Pictórica Press Ltd (bl.)**NASA:**ESA y el Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-Hubble/Europe Collaboration (tr).**293 Alamy Foto:**Archivo GL (bl). **295 Alamy Foto:** FLHC 96 (tr).**298 Alamy Foto:**Archivo de imágenes históricas de Granger (bl).**299 Biblioteca de fotografías científicas:**Equipo científico de la NASA / WMAP (br). **301 Alamy Foto:** Archivo de imágenes históricas de Granger (br). **NASA:**ESA y P. Oesch (Universidad de Yale) (clb).**305 Alamy Foto:** Dennis Hallinan (bl.).**Biblioteca de fotografías científicas:** Archivos Visuales Emilio Segre / Instituto Americano de Física (tr). **307 NASA:**JPL-Caltech (br).**Rex de Shutterstock:**(tl).**310 ojo vid:** Jeff Singer / Redux (bl.).**311 Alamy Foto:**BJ Warnick / Newscom (br).**315 Alamy Foto:**Caltech/UPI (tr).**Imágenes falsas:**Mark Garlick / Biblioteca de fotografías científicas (bl)

Todas las demás imágenes © Dorling Kindersley

Para más información ver: www.dkimages.com